

AGROECOLOGÍA

**Procesos Ecológicos en
Agricultura Sostenible**

Stephen R. Gliessman

Título original en inglés: Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture
Derechos de autor 1998 - Sleeping Bear Press
Editor de la edición en inglés: Eric Engles
ISBN 1-57504-043-3 (EUA)

Edición al español por: Eli Rodríguez, Tamara Benjamin, Laura Rodríguez y Alexandra Cortés.

Traducido del inglés por: Roseann Cohen, Alba Gonzalez-Jácome, Juan José Jiménez Osornio, Armando Mejía Núñez, V. Ernesto Mendez, Francisco Javier Rosado May, Arturo Aamal, Moisés Amador Alarcón, Iván René Armendáriz-Yañez, Juan Carlos Chacón Espinoza, Nydia del Rivero, Ana Escribano, Carlos Guadarrama Zugasti, Adrian Javier López Pérez, Ángel Martínez Becerra, Carlos Freddy Ortíz García, David J. Palma López, Francisco Javier Reyna Díaz, Juan Antonio Rivera Lorca, Octavio Ruiz Rosado, Ricardo J. Salvador, Laura Elena Trujillo-Ortega, Manuel de Jesus Amaya Castro, Juan Carlos Estrada Croker, Carlos Fabián Catzim Cruz, Raúl Alberto Hernández Maldonado, Luis Antonio Balam Tzeek, Addy Patricia Pool Cruz, María Gpe. de Jesús Romero Pool y Katia Liudmila Sandoval Jacobo.

Impresión: LITOCAT, Turrialba, Costa Rica, 2002

Diagramación y Artes: Silvia Francis S., Unidad de Comunicación, CATIE, Turrialba, C.R.

ISBN 9977-57-385-9. (S.R. Gliessman, Costa Rica)

Este libro representa la información obtenida de fuentes auténticas y de alta consideración. Se debe solicitar permiso para la reimpresión de este material, de acuerdo con la fuente indicada. Se incluye una gran variedad de referencias. Se realizaron todos los esfuerzos razonables para suministrar datos e información fiable; sin embargo, ni el autor ni el editor pueden asumir responsabilidad por la validación de todo el material o por la consecuencia de su uso.

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de este libro se puede reproducir de cualquier forma sin el consentimiento escrito del autor, excepto en el caso de breves extractos en artículos y publicaciones críticas.

Catalogación en la Fuente

630.277

G559 Gliessman, Stephen R.

Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible /

Stephen R. Gliessman. - Turrialba, C.R. : CATIE, 2002.

xiii, 359 p. ; 28 cm.

Incluye bibliografía e índice.

ISBN 9977-57-385-9

1. Agricultura ecológica 2. Agricultura sostenible
3. Sistemas de cultivo 4. Agricultura alternativa I. Título



Con estudios de postgrado en Botánica, Biología y Ecología de Plantas de la Universidad de California, Santa Bárbara, Stephen R. Gliessman ha acumulado más de 25 años de profesorado, investigación y experiencia en producción en agroecología. Sus experiencias internacionales tanto en agricultura de zonas tropicales como templadas, con sistemas de finca grandes y pequeños, con manejo tradicional y convencional, con actividades académicas y de campo, con división de producción orgánica y con uso de agro-

químicos sintéticos, provee una mezcla única de conocimiento, perspectivas y materiales que se incorporan en este libro. Él fue el fundador del Programa de Agroecología en Santa Cruz, Universidad de California, uno de los primeros programas formales en agroecología del mundo y es el Alfred Heller Profesor de Agroecología del Departamento de Estudios Ambientales en UCSC. El Dr. Gliessman también produce uvas y aceitunas en una finca orgánica con su esposa y su hermano en Santa Bárbara, California.

TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN A LA AGROECOLOGÍA

1. Importancia de los Sistemas Sostenibles para la Producción de Alimentos	3
<i>Prácticas de Agricultura Convencional</i>	3
<i>Por qué la Agricultura Convencional No Es Sostenible</i>	6
<i>Nos Estamos Quedando sin Alternativas</i>	11
<i>El Camino Hacia la Sostenibilidad</i>	12
Tema Especial: Historia de la Agroecología	14
2. El Concepto de Agroecosistemas	17
<i>La Estructura de los Ecosistemas Naturales</i>	17
<i>Funcionamiento de los Ecosistemas Naturales</i>	20
<i>Agroecosistemas</i>	24

II. LAS PLANTAS Y LOS FACTORES AMBIENTALES

3. La Planta	31
<i>Nutrición Vegetal</i>	31
<i>La Planta en su Interacción con el Ambiente</i>	38
4. Luz	43
<i>Radiación Solar</i>	43
<i>La Atmósfera como Filtro y Reflector</i>	44
<i>Importancia Ecológica de la Luz en la Tierra</i>	44
Tema Especial: Disminución del Ozono	45
<i>Características de la Exposición a la Luz Visible</i>	46
<i>Determinantes de las Variaciones de la Luz Natural</i>	47
<i>Tasa Fotosintética</i>	50
<i>Otras Formas de Respuesta a la Luz</i>	52
<i>Manejo de la Luz en Agroecosistemas</i>	54

5. Temperatura	59
<i>El Sol como Fuente de Calor y Energía para la Tierra</i>	59
Tema Especial: Causas y Consecuencias del Calentamiento Global	60
<i>Patrones de la Variación de la Temperatura sobre la Superficie de la Tierra</i>	61
<i>Respuestas de las Plantas a la Temperatura</i>	64
<i>Microclima y Agricultura</i>	66
6. Humedad y Precipitación	73
<i>Vapor de Agua en la Atmósfera</i>	73
<i>Precipitación</i>	74
Tema Especial: Precipitación Ácida	77
<i>Agroecosistemas de Temporal</i>	78
Estudio de Caso: Agricultura Hopi	84
7. El Viento	87
<i>Movimiento Atmosférico</i>	87
<i>Vientos Locales</i>	88
<i>Efecto Directo del Viento sobre las Plantas</i>	89
<i>Otros Efectos del Viento</i>	90
<i>Modificación y Aprovechamiento del Viento en los Agroecosistemas</i>	92
8. Suelo	101
<i>Procesos de Formación y Desarrollo del Suelo</i>	101
<i>Horizontes del Suelo</i>	103
<i>Características del Suelo</i>	105
<i>Nutrientes del Suelo</i>	109
<i>Materia Orgánica del Suelo</i>	111
<i>Manejo del Suelo</i>	112
Estudio de Caso: Manejo del Suelo en los Sistemas de Terrazas de Laderas de Tlaxcala, México	117
9. Agua en el Suelo	121
<i>Movimiento del Agua dentro y fuera del Suelo</i>	121
<i>Humedad Disponible en el Suelo</i>	123
<i>Capitación de la Humedad de Suelo por las Plantas</i>	124
<i>Exceso de Agua en el Suelo</i>	126

14. Recursos Genéticos en Agroecosistemas	195
<i>Cambio Genético en la Naturaleza y la Producción de la Diversidad Genética</i>	196
<i>Selección Dirigida y Domesticación</i>	198
Tema Especial: Orígenes de la Agricultura	199
Tema Especial: Beneficios y Riesgos de la Ingeniería Genética	204
<i>Mejoramiento Genético para Sostenibilidad</i>	210
15. Interacciones de Especies en Comunidades de Cultivos	215
<i>Interferencia a Nivel de Comunidad</i>	215
Tema Especial: La Historia del Estudio del Mutualismo	218
<i>Interferencias Mutualistas Benéficas en los Agroecosistemas</i>	219
Estudio de Caso: Cultivo de Cobertura con Centeno y Haba	221
Estudio de Caso: Cultivo de Cobertura de Mostaza para Manzanas Fuji	223
<i>Aprovechamiento de las Interacciones de Especies para la Sostenibilidad</i>	226
16. Diversidad y Estabilidad del Agroecosistema	229
<i>Enfoques y Oportunidades considerando el Sistema en su Totalidad</i>	229
Tema Especial: <i>Rhizobium</i>, Leguminosas y el Ciclo de Nitrógeno	231
<i>Diversidad Ecológica</i>	232
<i>Evaluación de la Diversidad de Cultivos y sus Beneficios</i>	240
<i>Colonización y Diversidad</i>	245
Estudio de Caso: Efecto de bordes de Arvenses en las Orillas de Parcela sobre la Colonización de Insectos en una Plantación de Coliflor	246
<i>Diversidad, Estabilidad y Sostenibilidad</i>	247
17. Perturbación, Sucesión y Manejo de Agroecosistemas	251
<i>Perturbación y Recuperación en Ecosistemas Naturales</i>	251
<i>Aplicaciones al Manejo de Agroecosistemas</i>	255
<i>Sistemas Agroforestales</i>	260
Estudio de Caso: Efecto de Árboles Sobre el Suelo en Tlaxcala, México	261
<i>Perturbación, Recuperación y Sostenibilidad</i>	268
18. La Energía en los Agroecosistemas	271
<i>Energía y las Leyes de Termodinámica</i>	271
<i>Captura de la Energía Solar</i>	272
<i>Insumos de Energía en la Producción de Alimentos</i>	274

<i>Hacia un Uso Sostenible de Energía en Agroecosistemas</i>	282
Estudio de Caso: Análisis Energético de la Producción de Fresa en Santa Cruz, California, y en Nanjing, China	284
19. La Interacción entre los Agroecosistemas y los Ecosistemas Naturales	289
<i>El Paisaje Agrícola</i>	289
<i>Manejo a Nivel de Paisaje</i>	292
Estudio de Caso: Diversidad de Paisaje en Tlaxcala, México	293
<i>El Papel de la Agricultura en la Protección de la Biodiversidad Regional y Global</i>	297
Tema Especial: La Iniciativa de la Biósfera Sostenible	298
IV. TRABAJANDO POR LA TRANSICIÓN HACIA LA SOSTENIBILIDAD	
20. Alcanzando la Sostenibilidad	303
<i>Aprendiendo de los Sistemas Sostenibles Existentes</i>	303
<i>La Conversión a Prácticas Sostenibles</i>	306
Estudio de Caso: Conversión a Producción Orgánica de Manzana	310
<i>Estableciendo Criterios para la Sostenibilidad Agrícola</i>	311
Estudio de Caso: Sostenibilidad en un Agroecosistema de un Poblado Chino	317
21. Desde una Agricultura Sostenible hacia Sistemas Alimentarios Sostenibles	319
<i>Una Agenda más Amplia</i>	319
<i>Hacia Sistemas Alimentarios Sostenibles</i>	323
Referencias	331
Glosario	341
Índice	349

PRÓLOGO

A mediados de los 80's, Steve Gliessman y yo organizamos un intercambio de seminarios: él vino a Georgia a presentar sus estudios de las prácticas agrícolas tradicionales en México, y explicar cómo se relacionan con el desarrollo de la agricultura sostenible, y yo fui a Santa Cruz, para explicar mis ideas de cómo aplicar conceptos básicos de ecología a la agricultura. En Santa Cruz yo estaba especialmente impresionado de los métodos para dar clases de Steve. Cada estudiante tenía asignado un pequeño lote donde montaba sus experimentos. Posteriormente utilicé una fotografía aérea de su laboratorio de campo en un artículo titulado "El Mesocosmo". Mientras estaba en Santa Cruz, le sugerí a Steve escribir un libro en agroecología. En ese momento era una nueva área interdisciplinaria que cada día atraía más atención. Me

alegra ver que después de 20 años de enseñar en el tema él ha preparado este libro de texto. Con cada año que pasa se hace más evidente que el uso excesivo actual de agroquímicos y de agua de riego no es solo uno de los mayores contribuyentes de una contaminación no de puntos concentrados, pero a largo plazo también insostenible. Por lo tanto, desarrollar un sistema de producción de alimentos más ecológicos es urgente. Estoy seguro de que los estudiantes encontrarán en este texto una introducción estimulante para lograr este objetivo.

Eugene P. Odum
Director Emérito
Instituto de Ecología de la
Universidad de Georgia, Athens.

SECCIÓN I

RECOMENDACIONES PARA EL USO DE ESTE LIBRO

Este libro pretende tener una doble identidad que refleja el origen de la agroecología; la cual proviene tanto del campo de la ciencia pura de la ecología como de la ciencia aplicada de la agronomía. Por un lado el libro está diseñado para enseñar ecología en el contexto de agricultura, y por otro lado enseñar agronomía con una perspectiva ecológica.

A pesar de la atención que reciben las prácticas de manejo de cultivos para la producción de alimentos, este libro no es un manual de agronomía sobre cómo cultivar. Hay varios cultivos que no están incluidos y solo hay referencia mínima a especies animales. Este libro pretende crear las bases para el entendimiento de conceptos que tienen aplicación universal a los agroecosistemas. Las prácticas agronómicas deben estar adaptadas a las condiciones particulares de cada región del planeta.

El texto está escrito de forma tal que combina los diferentes niveles de experiencia y conocimiento tanto de agricultura como de ecología. Las secciones I y II presentan un conocimiento básico sobre ecología y biología. El estudio adecuado de los capítulos del 1 al 12 preparará a los estudiantes para abordar los temas complejos de las secciones III y IV. Estas secciones podrán ser estudiadas directamente por aquellos que tengan una formación ecológica más avanzada. Sin embargo, recomiendo que lean ligeramente el capítulo 2 y se detengan un poco más en el capítulo 3 antes de abordar las dos últimas secciones. Sugiero a aque-

llos estudiantes avanzados a nivel de licenciatura y de posgrado, con capacitación en ecología y agronomía que complementen el texto con material adicional de investigación, publicado o no, para un mejor aprovechamiento del libro.

Este texto puede usarse en el sistema de trimestre o semestre. Sin embargo, la cantidad de material cubierto dependerá del profesor (a), de los estudiantes y del currículo de su especialidad. Idealmente el curso debe tener sesiones de laboratorio donde se puedan demostrar conceptos ecológicos en agricultura y como pueden aplicarse las metodologías ecológicas para el estudio de agroecosistemas.

Al final de cada capítulo hay una lista de lecturas sugeridas para que los estudiantes puedan expandir sus conocimientos. Asimismo hay una lista de preguntas que están diseñadas para facilitar la discusión de agroecología en torno al concepto de sostenibilidad; las preguntas no tienen una sola respuesta específica.

Los conceptos y principios usados en este texto pueden aplicarse a cualquier agroecosistema del mundo. Así como los agricultores están obligados a adaptarse a las condiciones cambiantes propias de su área, los estudiantes tienen ante sí el reto de hacer las adaptaciones necesarias para aplicar el contenido de este libro a sus propias condiciones. Para esto sugiero que incorporen casos locales apropiados, literatura publicada, y sobre todo estar en contacto directo con campesinos para encontrar la vinculación entre los conceptos y la práctica.

Agroecología Intensiva de verduras en la franja urbana de Shanghai, China. En sistema como este, la producción es destinada al consumo local, sin uso intensivo de fertilizantes, plaguicidas y maquinaria que contribuyen a los agroecosistemas de gran escala y monocultivos.

SECCIÓN I

INTRODUCCIÓN A LA AGROECOLOGÍA

La agricultura está actualmente en crisis. A pesar de que en todo el mundo la producción de alimentos es al menos igual que en el pasado, existen abundantes señales que muestran que las bases de su productividad están en peligro.

El primer capítulo de esta sección describe los problemas que enfrenta la agricultura actualmente y explica sus causas analizando las prácticas agrícolas modernas. Concluye con una explicación de como la

aplicación de conceptos y principios ecológicos en el diseño y manejo de sistemas de producción de alimentos – la esencia de la agroecología – puede ayudarnos a producir alimentos en forma más sostenible. El siguiente capítulo de esta sección presenta el marco teórico y conceptual básico de la agroecología, el cual será usado para estudiar agroecosistemas en todo este texto.



Agroecosistema intensivo de verduras en la franja urbana de Shangai, China. En sistemas como este, la producción es destinado al consumo local, sin uso intensivo de fertilizantes, plaguicidas y maquinaria que caracterizan a los agroecosistemas de gran escala y monocultivos.

IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS SOSTENIBLES PARA LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Durante la segunda mitad del siglo XX, la agricultura ha sido muy exitosa en la provisión de alimento a la creciente población humana. En los cultivos básicos como trigo y arroz se han incrementado significativamente los rendimientos, los precios se han reducido, la producción de alimentos generalmente ha excedido el crecimiento de la población, y la hambruna crónica ha disminuido. Este auge en la producción de alimento se debe principalmente, a los avances científicos, e innovaciones tecnológicas que incluyen el desarrollo de nuevas variedades de plantas, uso de fertilizantes y plaguicidas y el crecimiento de la infraestructura de riego.

A pesar de su éxito, nuestros sistemas de producción de alimentos se encuentran en el proceso de erosionar las bases fundamentales que los sostienen. Paradójicamente, las innovaciones tecnológicas, las prácticas, y las políticas que explican el incremento en la productividad, también están erosionando las bases de esa productividad. Por un lado han abusado y degradado los recursos naturales de los que depende la agricultura: suelo, agua, y diversidad genética. Por otro lado han creado una dependencia en el uso de recursos no renovables como el petróleo y también están fomentando un sistema que elimina la responsabilidad de los agricultores y trabajadores del campo del proceso de producir alimentos. En pocas palabras, la agricultura moderna es insostenible, a largo plazo no tiene el potencial para producir suficiente alimento como demanda la población debido, precisamente, a que está erosionando las condiciones que la hacen posible.

PRÁCTICAS DE AGRICULTURA CONVENCIONAL

La agricultura convencional se basa en dos objetivos: la maximización de la producción y de las ganancias. Para alcanzar estos objetivos se han desarrollado prácticas que no consideran las poco entendidas con-

secuencias a largo plazo ni la dinámica ecológica de los agroecosistemas. Las seis prácticas básicas que constituyen la columna vertebral de la agricultura moderna son: labranza intensiva, monocultivo, irrigación, aplicación de fertilizantes inorgánicos, control químico de plagas y manipulación genética de los cultivos. Cada una de ellas es usada por su contribución individual a la productividad, pero como un conjunto de prácticas forman un sistema en el cual cada una depende de la otra reforzando la necesidad, e usar todas las prácticas.

Las prácticas antes mencionadas también forman parte de una estructura que tiene su propia lógica. La producción de alimentos se lleva a cabo como un proceso industrial en el que las plantas asumen el papel de minifábricas, su producto se maximiza por el uso de insumos, la eficiencia de la productividad se incrementa mediante la manipulación de sus genes y, el suelo se convierte simplemente en el medio en el cual las raíces crecen.

Labranza Intensiva

La agricultura convencional se ha basado desde hace mucho tiempo en la práctica de arar el suelo en forma total, profunda y regular. El propósito de este arado intenso es romper la estructura del suelo para permitir un mejor drenaje, un crecimiento más rápido de las raíces, aireación y mayor facilidad para sembrar. El arado se usa también para controlar arvenses y para incorporar al suelo residuos de cultivos. Con la práctica típica, es decir cuando la labranza intensiva se combina con rotaciones cortas, el suelo es arado varias veces durante el año y en muchos casos esto deja al suelo sin cobertura vegetal por largos períodos. Para esto, frecuentemente se usa maquinaria pesada que realiza regularmente pasadas.

Irónicamente, la labranza intensiva tiende a degradar la calidad del suelo en diferentes formas. La

materia orgánica se reduce debido a la ausencia de cobertura vegetal y el suelo se compacta por el paso frecuente de maquinaria pesada. La falta de materia orgánica reduce la fertilidad del suelo y degrada su estructura, incrementando su compactación. Esto implica adicionar nutrimentos y usar más y más maquinaria para romper la compactación. La labranza intensiva también incrementa significativamente la erosión del suelo debido al viento o al agua.

Monocultivo

Durante las últimas décadas, los agricultores han adoptado cada vez más el monocultivo -siembra de un solo cultivo-, a menudo a gran escala. Ciertamente, el monocultivo permite un uso más eficiente de la maquinaria para preparar el suelo, sembrar, controlar arvenses y cosechar; también puede crear una economía de escala con respecto a la compra de semillas, fertilizantes y plaguicidas. El monocultivo es el tipo de producción natural de la agricultura con enfoque industrial, donde el trabajo manual se minimiza y se maximiza el uso de insumos con fuerte base tecnológica para incrementar la eficiencia y la productividad. En muchas partes del mundo el monocultivo de productos para exportación ha reemplazado a los sistemas tradicionales de policultivos de la agricultura de subsistencia. Las técnicas de monocultivo se combinan muy bien con otras prácticas de la agricultura moderna: el monocultivo tiende a favorecer la labranza intensiva, el control químico de plagas, la aplicación de fertilizantes inorgánicos, el riego y las variedades especializadas de cultivos. La relación del monocultivo con los plaguicidas sintéticos es particularmente fuerte; las grandes áreas de cultivo de una sola especie son más susceptibles al ataque devastador de plagas y por tanto requieren la protección mediante plaguicidas.

Aplicación de Fertilizantes Sintéticos

Los incrementos espectaculares en el rendimiento de cultivos que se han observado en los últimos años se explican por el uso, amplio e intensivo, de fertilizantes químicos sintéticos. En los Estados Unidos, la cantidad de fertilizante aplicado a los cultivos cada año se incrementó rápidamente después de la Segunda Guerra Mundial, pasando de 9 millones de toneladas en 1940 a más de 47 millones de toneladas en 1980. A

nivel mundial, el uso de fertilizantes se incrementó 10 veces entre 1950 y 1992.

Los fertilizantes se producen en cantidades enormes a un costo relativamente bajo, usando petróleo y depósitos minerales; pueden ser aplicados en forma fácil y uniforme, satisfaciendo los requerimientos nutricionales esenciales de las plantas. Debido a que estos productos satisfacen los requerimientos de las plantas a corto plazo, los agricultores no prestan atención a la fertilidad del suelo a largo plazo e ignoran los procesos que lo mantienen.

Los componentes minerales de los fertilizantes sintéticos son fácilmente lixiviados. En sistemas con riego, la lixiviación puede ser particularmente seria. Una gran cantidad del fertilizante aplicado termina en ríos, lagos y otros acuíferos, donde pueden causar eutrofización; los fertilizantes también pueden lixiviarse hacia los mantos acuíferos de donde se extrae agua potable, con la consecuente amenaza para la salud humana. Adicionalmente, el precio de los fertilizantes es variable; los agricultores no tienen control sobre su costo ya que depende de las variaciones del precio del petróleo.

Irrigación

El agua es un factor limitante para la producción de alimentos en muchas partes del mundo. El riego de cultivos con agua del subsuelo, reservas y ríos con cauces modificados, ha sido importante para incrementar la producción y la cantidad de tierra destinada a la agricultura. Se estima que solamente el 16% de la superficie agrícola mundial posee riego; sin embargo, produce el 40% de los alimentos (Serageldin 1995). Desafortunadamente, la agricultura con riego consume tal cantidad de agua que en aquellas áreas donde existe irrigación se ha notado un efecto negativo significativo en la hidrología regional. Uno de los problemas es que el agua del subsuelo se usa a una mayor velocidad que el de su recarga pluvial. Este consumo excesivo puede ocasionar problemas geológicos y en áreas cercanas al mar puede inducir la intrusión salina. Por tanto, usar agua del subsuelo significa tomar el agua de las futuras generaciones. En lugares donde el agua de riego proviene de ríos, la agricultura compite con las necesidades de las áreas urbanas y con las de otras especies que dependen de ella para su existencia. En sitios donde se han cons-



FIGURA 1.1

Riego por surco con tubería en la costa central de California. El uso excesivo de los acuíferos, de donde proviene el agua para riego, ha causado intrusión salina lo cual representa una amenaza para la sostenibilidad de la agricultura en la región.

truido represas para almacenar agua, usualmente se causan efectos ecológicos dramáticos en las zonas río abajo. El riego también tiene otro tipo de impacto: incrementa la posibilidad de lixiviación de minerales provenientes de los fertilizantes usados, llevándolos desde los campos de cultivo hasta los arroyos y ríos; también puede incrementar significativamente el grado de erosión del suelo.

Control Químico de Plagas y Arvenses

Después de la Segunda Guerra Mundial, los plaguicidas sintéticos fueron la novedad científica, ampliamente usados en la guerra del ser humano contra las

plagas y enfermedades que lo afectaban. Estos agentes químicos tenían como atractivo ofrecer a los agricultores una solución definitiva contra las plagas que afectaban sus cultivos y, por ende, a sus ganancias. Sin embargo, esta promesa ha demostrado ser falsa. Los plaguicidas pueden bajar dramáticamente las poblaciones de plagas a corto plazo, pero debido a que también eliminan a sus enemigos naturales, las plagas rápidamente incrementan sus poblaciones a niveles incluso mayores a los que tenía antes de aplicar estos químicos. Así, el agricultor se ve forzado a usar más y más productos químicos. Esta dependencia a los plaguicidas puede considerarse como una "adicción". Al ser expuestas continuamente a plaguicidas las poblaciones de plagas quedan sujetas a una selección natural intensiva que resulta en resistencia a los plaguicidas. Cuando la resistencia se incrementa los agricultores se ven obligados a usar cantidades mayores de plaguicidas u otros productos químicos que eventualmente promoverán mayor resistencia por parte de las plagas.

A pesar que el problema de dependencia a plaguicidas es ampliamente reconocido, muchos agricultores -especialmente en países en desarrollo- no usan otras opciones. La venta de plaguicidas ha ido en constante aumento, en 1994 se informó un récord de 25 mil millones de dólares. Irónicamente, las pérdidas de cosechas causadas por plagas se ha mantenido constante a pesar del incremento en el uso de plaguicidas (Pimentel *et al.* 1991).

Además de los altos costos por el uso de plaguicidas (incluyendo insecticidas, fungicidas y herbicidas), también hay que tomar en cuenta los efectos negativos que ocasionan al ambiente y a la salud humana. Al aplicarse a los campos de cultivo, los plaguicidas pueden ser lavados o lixiviados hacia corrientes de agua superficiales o subterráneos donde se incorporan a la cadena alimenticia, afectando poblaciones de animales en cada nivel trófico y persistiendo hasta por decenios.

Manipulación del Genoma Vegetal

Por milenios, la humanidad ha escogido cultivos por sus características especiales así como la manipulación de especies vegetales fue una de las bases de la agricultura. Así dio inicio la agricultura. Sin embargo, en décadas recientes los avances tecnológicos han



FIGURA 1.2
Aspersión amplia para el control de la palomilla de la manzana en un cultivo de manzana localizado en el Valle del Pájaro, California.

producido una revolución en la forma en que se pueden manipular los genes de las plantas. Primero se desarrollaron técnicas de cruzamiento que dieron origen a semillas híbridas, las cuales combinan características deseadas de dos o más variedades de la misma especie. Las variedades híbridas son más productivas que sus variedades similares no híbridas, siendo así uno de los factores principales que explican el incremento en la producción de alimentos durante la llamada "revolución verde". Sin embargo, las variedades híbridas a menudo requieren condiciones óptimas para alcanzar todo su potencial, esto implica la aplicación intensiva de fertilizantes inorgánicos y de plaguicidas ya que no cuentan con la resistencia natural de sus antecesores. Adicionalmente, las plantas híbridas no pueden producir semillas con el mismo genoma que sus progenitores lo cual hace a los agricultores dependientes de los productores comerciales de semillas.

Los recientes descubrimientos en ingeniería genética han permitido la creación de variedades con información genética proveniente de diferentes organismos, modificando sustancialmente el genoma original. Las variedades así formadas todavía no son usadas ampliamente en agricultura, pero no hay duda que lo serán si los criterios de decisión son solamente el rendimiento y las ganancias.

PORQUE LA AGRICULTURA CONVENCIONAL NO ES SOSTENIBLE

Todas las prácticas de manejo usadas en la agricultura convencional tienden a favorecer la alta productividad a corto plazo, comprometiendo así la productividad de los cultivos en el futuro. En consecuencia, cada vez es más evidente que las condiciones necesarias para sostener la productividad se están erosionando. Por ejemplo, en el decenio pasado todos los países que adoptaron las prácticas de la "revolución verde" han experimentado una reducción en el crecimiento anual de su sector agrícola. Por otra parte, en muchas áreas donde en los años 60 se institucionalizó el uso de prácticas modernas (p.e. semillas mejoradas, el monocultivo y la aplicación de fertilizantes) para la producción de granos, se ha notado que los rendimientos no se han incrementado o que incluso han disminuido después de aumentos espectaculares en la producción. A nivel mundial, el rendimiento de la mayoría de cultivos se ha mantenido, las reservas de granos se están reduciendo y la producción de granos por persona ha decrecido desde los años 80 (Brow 1997).

La Figura 1.3 muestra el índice de producción anual per capita a nivel mundial, de 1970 a 1995, estimado por la FAO (Food and Agriculture Organiza-

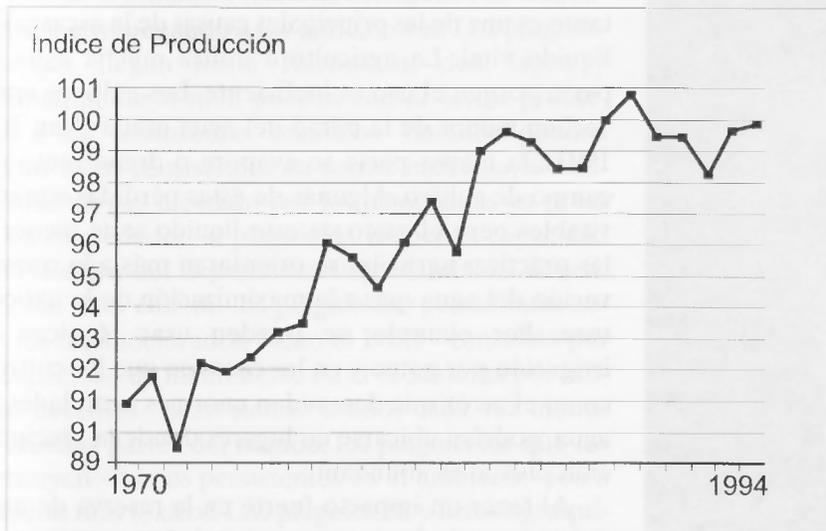


FIGURA 1.3
Índice anual de producción agrícola neta per-capita a nivel mundial. Fuente: FAO.

tion – Naciones Unidas). Los datos indican que después de una tendencia de incremento por muchos años, la producción agrícola per capita se estancó en los años 90. Esta situación es el resultado de la reducción de la producción anual combinada con un crecimiento logarítmico de la población.

Son muchas las formas en que la agricultura convencional perjudica la productividad futura. Los recursos agrícolas como el suelo, el agua y la diversidad genética han sido usados excesivamente y degradados, los procesos ecológicos globales sobre los que depende la agricultura han sido alterados y las condiciones sociales que permiten la conservación de los recursos han sido debilitados y, en algunos casos, desmantelados.

Degradación del Suelo

De acuerdo con un estudio de las Naciones Unidas, en 1991 el 38% del suelo cultivado a partir de la 2ª Guerra Mundial había sido dañado debido a prácticas agrícolas (Oldeman *et al.* 1991). La degradación del suelo involucra la salinización, la extracción excesiva de agua, la compactación, la contaminación por plaguicidas, reducción en la calidad de la estructura

del suelo, pérdida de fertilidad y erosión. Aunque todas estas formas de degradación del suelo son problemas severos, la erosión es el problema más extendido. En África, Sur y Norte América por ejemplo, la pérdida de suelo debido a erosión eólica o hídrica es de 5-10 t/ha/año, mientras que en Asia esto llega a 30 t/ha/año. Si comparamos estos valores con la formación de suelo que es aproximadamente de 1 t/ha/año, es obvio que en un corto tiempo se ha perdido un recurso que se llevó siglos en formarse.

La relación causa-efecto entre la agricultura convencional y la erosión del suelo, es directa. La labranza intensivo combinada con el monocultivo y la rotaciones de cultivo cortas, hace que el

suelo esté expuesto al efecto erosivo del viento y la lluvia. El suelo que se pierde de esta manera es rico en materia orgánica, el componente de mayor valor. De manera similar, la irrigación es una causa directa de erosión hídrica en suelos agrícolas.

La combinación de erosión con otras formas de degradación del suelo explica el aumento en la pérdida de fertilidad de los suelos agrícolas en el mundo. Algunas áreas definitivamente son abandonadas debido a la erosión severa o la salinización. Los suelos que aún son productivos lo deben a la adición de fertilizantes sintéticos. La fertilización puede sustituir temporalmente los nutrientes perdidos, pero no puede reconstruir la fertilidad ni restaurar la salud del suelo; por otro lado, su uso tiene varias consecuencias negativas, como se discutió anteriormente.

Debido a que el factor suelo es un recurso finito y debido a que los procesos naturales para restaurar o renovar el suelo no ocurren a la misma velocidad en que es degradado, la agricultura no puede ser sostenible sino hasta que se dé marcha atrás a los procesos de degradación del suelo. Las prácticas agrícolas actuales deben cambiar significativamente si es que realmente se busca la conservación del suelo para las futuras generaciones.



FIGURA 1.4

Erosión severa de suelo en la pendiente de una colina después de una intensa lluvia de invierno. En esta región dedicada al cultivo de fresa, llamada cuenca del Elkhorn Slough, en la parte central de California, la pérdida de suelo en algunos años excede las 150 toneladas/acre.

Uso Excesivo y Pérdida de Agua

La cantidad de agua dulce utilizable es limitada y se está convirtiendo en un recurso bastante escaso debido a la creciente demanda y competencia entre la industria, las crecientes ciudades y agricultura. Algunos países tienen muy poca agua para favorecer el crecimiento de su agricultura o industria. En muchos lugares la demanda de agua se satisface extrayendo de acuíferos subterráneos cantidades mayores que el de su reemplazo por lluvia; en otros lugares los ríos están siendo drenados causando un efecto negativo en los ecosistemas acuáticos y riparios y la vida silvestre dependiente de ellos.

La agricultura utiliza aproximadamente dos terce-

ras partes del agua disponible a nivel mundial, por tanto es una de las principales causas de la escasez del líquido vital. La agricultura utiliza mucha agua en parte porque el uso es ineficiente. Los cultivos aprovechan menos de la mitad del agua usada (Van Tuijl 1993), la mayor parte se evapora o drena fuera del campo de cultivo. Algunas de éstas pérdidas son inevitables pero el gasto de este líquido sería menor si las prácticas agrícolas se orientaran más a la conservación del agua que a la maximización de la agricultura. Por ejemplo, se pueden usar técnicas de irrigación por goteo y en los casos en que los cultivos como el arroz que demandan enormes cantidades de agua, podrían ubicarse en lugares donde la precipitación pluvial es abundante.

Al tener un impacto fuerte en la reserva de agua dulce, la agricultura convencional tiene un impacto en los patrones hídricos globales por la extracción de grandes cantidades de agua subterránea, la agricultura ha causado una transferencia masiva de los continentes a los océanos. Un estudio publicado en 1994 indica un volumen de intrusión anual de 190 mil millones de metros cúbicos de agua y ha elevado el nivel del mar en 1.1 cm (Sahagian *et al.* 1994). A nivel regional, donde la irrigación es practicada a gran escala, la agricultura tiene impacto en la hidrología y microclima. Esto se debe a que el agua se transfiere de su lugar original a campos de cultivo y al suelo de éstos provocando niveles mayores de evaporación y cambios en la humedad ambiental que pueden afectar los patrones de precipitación pluvial. Estos cambios tienen un impacto significativo en el ecosistema natural y en la vida silvestre.

Si la agricultura convencional continúa usando el agua de la misma forma ineficiente, serán comunes las crisis de diferentes formas: cambios en el ambiente, habitantes marginados por falta de agua, limitaciones de irrigación de cultivos y, sobre todo, afectando a las futuras generaciones.

Contaminación del Ambiente

La mayor contaminación del agua se debe a prácticas agrícolas por el uso de fertilizantes, plaguicidas, sales y otros agroquímicos.

Los plaguicidas -aplicados con regularidad y en grandes cantidades, a menudo mediante avionetas- fácilmente llegan mas allá de los límites del área de

cultivo: de afectando a insectos benéficos y la vida silvestre y envenenando a los agricultores. Los plaguicidas que llegan hasta riachuelos, ríos, lagos y eventualmente el mar, pueden causar serios problemas a los ecosistemas acuáticos. También pueden afectar otros ecosistemas en forma indirecta, al convertirse un pez afectado por los plaguicidas en presa de un depredador, el plaguicida reduce la capacidad reproductiva del depredador impactando así al ecosistema. Aún cuando los plaguicidas persistentes como los organoclorados, como el DDT –conocido por su capacidad de mantenerse en el ecosistema por muchos decenios- están siendo usados cada vez menos en muchas partes del mundo, los plaguicidas que los sustituyen –menos persistentes en el ambiente- son a menudo más tóxicos. Los plaguicidas y otros agroquímicos también penetran hasta los acuíferos subterráneos, donde contaminan las fuentes de agua potable. Esto ha ocurrido en al menos 26 estados de los Estados Unidos. Un estudio de EPA (Environmental Protection Agency) encontró en 1995 que en 28 de 29 ciudades del medio oeste de Estados Unidos el agua potable contenía herbicidas.

Los fertilizantes lixiviados no tienen una toxicidad directa como los plaguicidas, pero su efecto ecológico puede ser igualmente perjudicial. En ecosistemas acuáticos y marinos, los fertilizantes promueven el crecimiento excesivo de algas, causando eutrofización y la muerte de muchos tipos de organismos. Los nitratos de algunos fertilizantes también son los principales contaminantes del agua potable en muchas regiones. Las sales y sedimentos son también contaminantes agrícolas que afectan los cauces de los ríos y riachuelos, contribuyendo con la destrucción de las zonas de pesca y pueden hacer que los humedales no sean aptos para la presencia de pájaros.

Es claro, entonces, que las prácticas de la agricultura convencional están degradando el ambiente en forma global, reduciendo la diversidad, perturbando el balance de los ecosistemas naturales y finalmente arriesgando los recursos naturales de los cuales dependen la población humana actual y futura.

Dependencia de Insumos Externos

La agricultura convencional ha logrado altos rendimientos debido al incremento en el uso de insumos agrícolas. Estos insumos incluyen tales como la irriga-

ción, fertilizantes y plaguicidas, la energía usada para fabricar esos materiales y el combustible necesario para operar la maquinaria agrícola y bombas de riego y la tecnología también es una forma de insumo que se manifiesta en semilla híbrida, nueva maquinaria y nuevos agroquímicos. Todos estos insumos son externos al sistema agrícola; su uso intensivo tiene impacto en las ganancias del agricultor, en el uso de recursos no renovables y en el control de la producción agrícola.

El uso prolongado de las prácticas convencionales implica mayor dependencia hacia los insumos externos. En tanto la labranza intensiva y el monocultivo degradan el suelo, la fertilidad dependerá más y más de los insumos derivados del petróleo como el fertilizante nitrogenado y otros nutrimentos.

La agricultura no puede ser sostenible mientras dependa de insumos externos. En primer lugar, los recursos naturales los cuales provienen los insumos, son no renovables y de cantidades finitas. En segundo lugar, la dependencia a insumos externos hace que el agricultor, las regiones y todo el país sean vulnerables a la oferta de insumos, a las fluctuaciones de mercado y al incremento de los precios.

Pérdida de Diversidad Genética

Durante la mayor parte de la historia de la agricultura, los humanos han incrementado la diversidad genética de los cultivos a nivel mundial. Hemos sido capaces de ello debido a dos factores; por un lado hemos seleccionado variedades con características especiales para cada lugar mediante el fitomejoramiento y por otro lado continuamente hemos intentado domesticar plantas silvestres, enriqueciendo así nuestro banco de germoplasma. En las últimas décadas, sin embargo, la diversidad genética de las plantas domesticadas se ha reducido. Muchas variedades se han extinguido y muchas otras están en vías de hacerlo. Al mismo tiempo, la base genética de la mayoría de los principales cultivos se ha estado uniformando. Por ejemplo, el 70% del cultivo de maíz a nivel mundial involucra solamente a seis variedades.

La pérdida de la diversidad genética se debe principalmente al énfasis de la agricultura convencional en la productividad a corto plazo, tanto de rendimiento como de ganancias. Cuando se desarrollan variedades altamente productivas, se tiende a adoptarlas y

sustituir otras variedades aún cuando éstas posean otras características deseables. La homogeneidad genética de los cultivos es consecuente con la maximización del rendimiento ya que permite la estandarización de las prácticas de manejo.

El problema consiste en que al incrementar la uniformidad genética del cultivo, este se vuelve vulnerable al ataque de plagas y enfermedades que adquieren resistencia tanto a los plaguicidas como a las defensas de las plantas. También el cultivo se hace más vulnerable a los cambios climáticos y a otros factores ambientales. El problema se vuelve más grave cuando va acompañado de una disminución del banco genético de cada cultivo, cada vez hay menos fuentes de genes para incorporar resistencia o adaptación a plagas o a cambios climáticos. La importancia de contar con una gran reserva genética se ilustra con el siguiente ejemplo. En 1968 una plaga atacó el cultivo de sorgo en los Estados Unidos, causando un daño estimado de US\$ 100 millones. El año siguiente se invirtieron US\$ 50 millones en insecticidas para el control de esta plaga. Poco después algunos científicos descubrieron una variedad de sorgo resistente a esta plaga; nadie la conocía pero ahí estaba la variedad de sorgo. Esta variedad se utilizó para crear un híbrido que se usó extensivamente, no hubo necesidad de usar plaguicidas. Tal resistencia a la plaga por parte de una variedad de sorgo es común en plantas domesticadas que "esconden" esta característica en su genoma, "esperando" ser usado. Sin embargo, a medida que las variedades se pierden, la invaluable cantidad de genes también se pierde, reduciendo así el potencial de las futuras generaciones para poder hacer uso adecuado de ellas.

Pérdida del Control Sobre la Producción Agrícola por Parte de Comunidades Locales

Junto con la agricultura de monocultivo a gran escala se ha producido una dramática reducción en el número de granjas y de agricultores, especialmente en los países en desarrollo donde la mecanización y el uso masivo de insumos son la norma. De 1920 hasta la actualidad el número de granjas o ranchos en los Estados Unidos se ha reducido de más de 6,5 millones a 2 millones, y el porcentaje de la población que vive y trabaja en esas granjas ha bajado hasta el 2%. En países en desarrollo, la población rural que traba-

ja principalmente en agricultura continúa emigrando a las ciudades.

Además de promover el abandono de las zonas rurales, la agricultura a gran escala, orientada hacia la maximización de la producción y de las ganancias, también pretende controlar la producción de alimentos en las comunidades rurales. Esta tendencia es preocupante porque el manejo requerido para la producción sostenible debe incluir el control de la comunidad local sobre sus recursos y el conocimiento del lugar. La producción de alimentos con base en las exigencias del mercado global y el uso de tecnología desarrollada externamente, inevitablemente contradice los principios ecológicos. El manejo basado en la experiencia acumulada a lo largo de los años es sustituida por insumos externos, ocasionándose que se requiera cada vez de más capital, energía y recursos no renovables.

Los pequeños agricultores tienen muy poca influencia para detener el avance de la agricultura industrial. Ellos no tienen los recursos para adquirir maquinaria moderna y poder así competir con la agricultura de gran escala. Además, el sistema requiere por un lado que los ingresos se compartan con los intermediarios para llevar el producto al mercado y por otro lado existe una política de precios bajos. Así, a los pequeños agricultores se les han reducido sus ganancias cada vez más durante estos años, siendo en 1990 de solamente 9% como se muestra en la Fig. 1.5 (Smith 1992). Con este escenario de incertidumbre económica, existen pocos incentivos para que los agricultores permanezcan y mantengan su granja; una opción es venderla a productores con mayor capacidad. En los casos en que las granjas están adyacentes a centros de población con rápido crecimiento, el incentivo es vender la tierra para desarrollo urbano a un precio alto. Por ejemplo en el Valle Central de California entre 1950 y 1990, cientos de miles de hectáreas antes dedicadas al cultivo se han destinado a desarrollo urbano (American Farmland Trust 1995).

En países en desarrollo, el crecimiento de la agricultura de gran escala de cultivos para exportación tiene un efecto más ominoso. A medida en que la población rural –quienes producían alimentos y suplían con ellos a las ciudades– es expulsada de sus tierras y emigra a las ciudades, se vuelven dependientes de quienes producen alimentos. Debido a que la mayoría de los alimentos producidos por estos países se

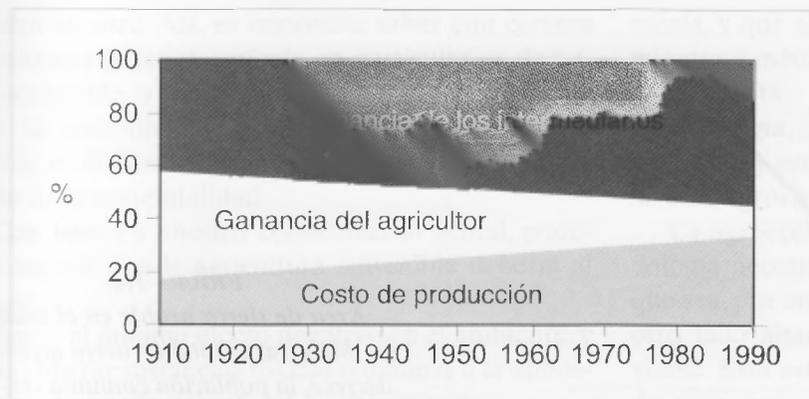


FIGURA 1.5
Reducción en las ganancias del agricultor. Los costos de producción y las ganancias de los intermediarios se han incrementado.
 Fuente: Smith (1992).

destinan a la exportación, grandes cantidades de alimentos básicos deben ser importados para satisfacer la demanda de las crecientes poblaciones urbanas. Entre 1970 y 1990, la importación de alimentos provenientes de países desarrollados se han incrementado hasta 500%, lo cual representa un peligro para la seguridad alimentaria de los países en desarrollo y los hace más dependientes de los países desarrollados.

Inequidad Global

A pesar de los incrementos en productividad, todavía persiste la hambruna en el mundo. También hay enormes diferencias entre la cantidad de calorías consumidas y la seguridad alimentaria de la población de las naciones desarrolladas con aquellas en desarrollo. Los países en desarrollo a menudo producen alimentos para exportar a los países desarrollados, usando insumos comprados a esos países. Las ganancias son para un grupo pequeño de propietarios de tierras, mientras mucha gente padece hambre. Además, aquellos que han sido desplazados de sus tierras por los grandes productores que buscan más tierra para producir cultivos de exportación no pueden satisfacer sus necesidades alimenticias.

Además de ocasionar sufrimientos innecesarios, estas relaciones de inequidad tienden a promover prácticas y políticas agrícolas basadas en motivaciones económicas de corto plazo y, no en consideraciones ecológicas de largo plazo. Por ejemplo, en países en desarrollo los agricultores de subsistencia desplazados

por los terratenientes a menudo tienen que cultivar en tierras marginales. El resultado es más deforestación, erosión severa y serios daños sociales y ecológicos.

Aún cuando la inequidad entre países y entre grupos dentro de cada país siempre ha existido, la modernización de la agricultura ha acentuado estas inequidades debido a que los beneficios no son distribuidos adecuadamente. Aquellos con más tierra y recursos tienen más acceso a las tecnologías modernas. Mientras la agricultura convencional se base en tecnologías del primer

mundo y solamente unos cuantos tengan acceso a insumos externos, se seguirá perpetuando la inequidad que a su vez constituye una barrera para alcanzar la sostenibilidad.

NOS ESTAMOS QUEDANDO SIN ALTERNATIVAS

Durante el siglo XX, el incremento en la producción de alimentos se ha dado en dos maneras: a) por el incremento en la superficie de cultivo y b) por el incremento de la productividad. Como se ha señalado anteriormente, muchas de las técnicas usadas para incrementar la productividad afectan negativamente el suelo en el largo plazo. Los mecanismos convencionales usados para incrementar la productividad no aseguran la satisfacción de la demanda de alimentos para la creciente población mundial.

Por otro lado, incrementar la producción aumentando la superficie de cultivo también es problemático. En casi todo el mundo el suelo que es adecuado para uso agrícola ya ha sido convertido para algún uso humano; del área total disponible la proporción que podría ser cultivada está disminuyendo rápidamente debido al crecimiento urbano, degradación del suelo, y desertificación. En los próximos años el crecimiento de las ciudades y la industrialización continuará absorbiendo más suelo agrícola, a menudo el mejor.

La figura 1.6 ilustra el problema. Desde finales de los años 80s el incremento anual de tierra cultivada que se observaba desde los años 70 (y desde antes) se detuvo e inició su reducción en los años 90.

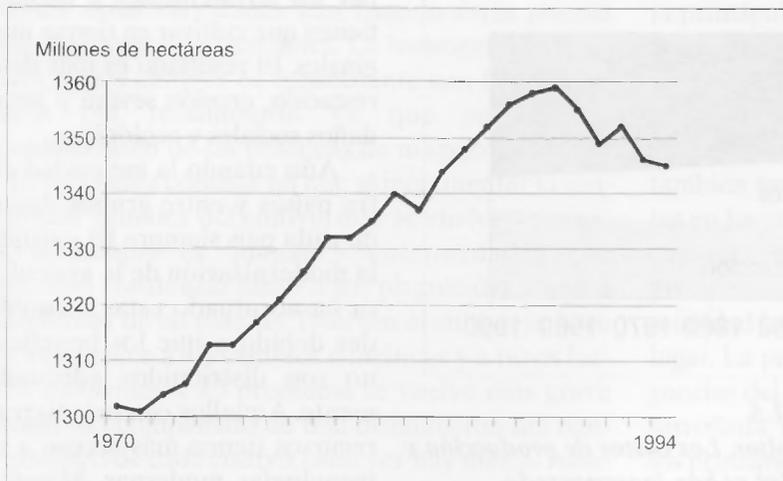


FIGURA 1.6
Área de tierra arable en el mundo. Mientras el total de tierra arable decrece, la población continúa creciendo. Al mismo tiempo, la producción por hectárea se ha mantenido estable. Fuente: FAO.

Tampoco es posible incrementar el área de cultivo mediante la irrigación. En la mayoría de las zonas secas el agua es escasa y no hay excedente disponible para expandir la agricultura. Desarrollar nuevas fuentes de suministro de agua ha traído consecuencias ecológicas severas. En lugares que dependen de reservas subterráneas para la irrigación, como Arabia Saudita y partes de Estados Unidos, habrá escasez en un futuro cercano debido a que la extracción para uso no agrícola es cada vez mayor que la recarga.

Todavía existen pequeñas pero significativas áreas que pueden ser convertidas en uso agrícola y que actualmente están cubiertas por vegetación natural. Algunas de estas áreas están siendo convertidas, pero esta manera de aumento de la producción también tiene límites. Primero, mucha de esta tierra son bosques húmedos tropicales donde el suelo no puede mantener una producción agrícola continua. Segundo, estas áreas con vegetación natural están siendo reconocidas por su valor como hábitats para diversidad biológica, por su importancia en el equilibrio del dióxido de carbono en la atmósfera y para el equilibrio climático global. Debido a estas razones y al esfuerzo de grupos ambientalistas, una gran proporción de las áreas naturales se mantendrá intacta.

EL CAMINO HACIA LA SOSTENIBILIDAD

La única opción que nos queda es la de preservar la productividad, a largo plazo, de la superficie agrícola del mundo junto con cambios necesarios en nuestros

patrones de consumo y uso del suelo, buscando una mayor equidad que beneficie a todos, desde los agricultores hasta los consumidores. La primera parte de este reto para el futuro define el objetivo de este libro; la segunda parte que va un poco más allá de los alcances de este libro, conlleva la reconceptualización de la agricultura, aspecto discutido en este libro.

Para preservar la productividad de la agricultura, se requieren sistemas sostenibles de producción de alimentos. La sostenibilidad se puede alcanzar mediante prácticas de cultivo basadas en el conocimiento adecuado y profundo de los procesos ecológicos que suceden tanto en las parcelas de producción como en el contexto de las cuales ellas son parte. Con estas bases podemos enfocarnos hacia los cambios sociales y económicos que promueven la sostenibilidad en todos los sectores del sistema alimentario.

¿Qué es Sostenibilidad?

La palabra sostenibilidad tiene diferentes significados para diferentes personas; sin embargo, hay consenso en que tiene una base ecológica. En una forma general, la sostenibilidad es una versión del concepto de "rendimiento sostenido", es decir, la condición o capacidad de cosechar a perpetuidad cierta biomasa de un sistema que tiene la capacidad de renovarse por sí mismo o que su renovación no está en riesgo.

Debido a que la palabra "perpetuidad" nunca puede ser demostrada en el presente, la prueba de sostenibilidad recae siempre en el futuro, fuera de

nuestro alcance. Así, es imposible saber con certeza cuando una práctica agrícola en particular es de hecho sostenible, o bien si un grupo de prácticas constituye la sostenibilidad. Sin embargo, lo que sí es posible, es demostrar cuando una práctica se está alejando de la sostenibilidad.

Con base en nuestro conocimiento actual, podemos sugerir que la agricultura sostenible debería al menos:

- tener el mínimo efecto negativo en el ambiente, y no liberar sustancias tóxicas o dañinas a la atmósfera y el agua superficial o subterránea;
- preservar y reconstruir la fertilidad del suelo, prevenir la erosión y mantener la salud ecológica del suelo;
- usar agua en forma tal que permita la recarga de los acuíferos y su uso por parte de la población humana y otros elementos del ecosistema;
- hacer uso de los recursos dentro del agroecosistema, incluyendo las comunidades cercanas, reemplazando los insumos externos con un mejor ciclo de nutrimentos, adecuada conservación y amplio conocimiento ecológico;
- valorar y conservar la diversidad biológica, tanto en los paisajes silvestres como los domesticados; y
- garantizar la equidad en el acceso a las prácticas agrícolas apropiadas, al conocimiento y a la tecnología así como permitir el control local de los recursos agrícolas.

El Papel de Agroecología

La agricultura del futuro debe ser tanto sostenible como altamente productiva si se desea producir alimentos para una creciente población humana. Estos retos significan que no podemos simplemente abandonar completamente las prácticas convencionales y retornar a las prácticas tradicionales indígenas. Aún cuando la agricultura tradicional puede contribuir con invaluable modelos y prácticas para desarrollar una agricultura sostenible, no puede producir la cantidad de alimentos que requieren los centros urbanos y los mercados globales porque está dirigida a suplir las necesidades locales y a pequeña escala.

El llamado demanda un nuevo enfoque hacia la agricultura y desarrollo agrícola construida sobre la base de la conservación de los recursos y otros aspectos de la agricultura tradicional, local y de pequeña

escala, y que al mismo tiempo aproveche los conocimientos y métodos modernos de la ecología. Este enfoque está incluido en la ciencia llamada **agroecología**, la cual se define como *la aplicación de conceptos y principios ecológicos para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles*.

La agroecología provee el conocimiento y metodología necesarios para desarrollar una agricultura que sea, por un lado ambientalmente adecuado y por otro lado altamente productiva y económicamente viable. Esta establece condiciones para el desarrollo de nuevos paradigmas en agricultura, en parte porque prácticamente elimina la distinción entre la generación de conocimiento y su aplicación. También valoriza el conocimiento local empírico de los agricultores, el compartir este conocimiento y su aplicación al objetivo común de sostenibilidad.

Los métodos y principios ecológicos constituyen las bases de la agroecología. Estos son esenciales para determinar: (1) si una práctica agrícola particular, un insumo o decisión de manejo es sostenible, y (2) la base ecológica para decidir la estrategia de manejo y su impacto a largo plazo. Conociendo lo anterior, se pueden desarrollar prácticas que reduzcan la compra de insumos externos, que disminuyan los impactos de esos insumos cuando se deban usar, y permite establecer bases para diseñar sistemas que ayuden a los agricultores a mantener sus granjas y sus comunidades.

Aún cuando el enfoque agroecológico comienza prestando atención a un componente particular de un agroecosistema y su posible alternativa de manejo, durante el proceso establece las bases para muchas otras cosas. Aplicando el enfoque en forma más amplia, nos permite examinar el desarrollo histórico de las actividades agrícolas en una región y determinar las bases ecológicas para seleccionar prácticas más sostenibles para esa zona. También nos puede ayudar a encontrar las causas de los problemas que han emergido como resultado de prácticas insostenibles. Todavía más, el enfoque agroecológico nos ayuda a explorar las bases teóricas para desarrollar modelos que pueden facilitar el diseño, las pruebas y la evaluación de agroecosistemas sostenibles. Finalmente, el conocimiento ecológico de la sostenibilidad de agroecosistemas, debe reestructurar el enfoque actual de la agricultura con el objetivo de que la humanidad disponga de sistemas sostenibles de producción de alimentos.

TEMA ESPECIAL

Historia de la Agroecología

Durante el siglo XX, las dos ciencias que componen la agroecología: Agronomía y la ecología, han tenido una relación distanciada. Por un lado la ecología se ha enfocado principalmente en el estudio de los sistemas naturales, mientras que la agronomía ha aplicado los resultados de investigaciones científicas a la agricultura. Los límites establecidos por cada una de estas ciencias, una considerada como teórica y la otra como práctica, las ha mantenido relativamente separadas. Con algunas excepciones importantes, el análisis ecológico de los sistemas agrícolas es muy reciente.

A fines de los años 20 hubo un intento de combinar agronomía con ecología, dando origen al campo de "ecología de cultivos". Los científicos de esta disciplina se enfocaron al estudio de las condiciones físico-ambientales donde crecían los cultivos para determinar los mejores sitios de cultivo. En los años 30, se propuso el término *agroecología* para indicar la aplicación de ecología a la agricultura. Sin embargo, debido a que la ecología se desarrolló más como una ciencia experimental enfocada a sistemas naturales, los ecólogos se alejaron de la Ecología de Cultivos, dejándolo a los agrónomos. Así, el término "agroecología" aparentemente se olvidó.

Después de la segunda Guerra Mundial, la ecología continuó su desarrollo como una ciencia pura y el éxito de la Agronomía se midió en sus resultados prácticos, debido en parte a la creciente mecanización y uso de agroquímicos. De este modo, los investigadores de éstas disciplinas se fueron alejando poco a poco entre sí.

A finales de los años 50, la consolidación del concepto de "ecosistema" atrajo nuevamente el interés en la Ecología de Cultivos, esta vez bajo la forma de "Ecología agrícola". El concepto de ecosistema propició, por primera vez, un marco de referencia lo bastante coherente y general para examinar a la agricultura bajo una perspectiva ecológica. Sin embargo, fueron pocos los investigadores que lo aprovecharon.

En los años 60 y 70, el interés en la aplicación de

la ecología a la agricultura se intensificó debido a la investigación en las áreas de: ecología de comunidades y poblaciones, enfoques a nivel de sistemas y el aumento en la conciencia ambiental por parte de la población. Un hecho importante a nivel mundial ocurrió en 1974 cuando en el Primer Congreso Internacional de Ecología un grupo de participantes presentó un informe titulado "Análisis de Agroecosistemas".

A medida que más ecólogos en los años 70 entendieron que los sistemas agrícolas eran legítimas áreas de estudio y que más agrónomos aceptaron el valor del enfoque ecológico, las bases de la agroecología crecieron rápidamente. A inicios de los años 80 la agroecología emergió como una disciplina distinta y única para el estudio de agroecosistemas. El conocimiento y entendimiento de la agricultura tradicional en países en desarrollo tuvo una influencia particular en este período. Varios investigadores reconocieron a estos sistemas como verdaderos ejemplos de agroecosistemas manejados con bases ecológicas (ej. Gliessman 1987a, Gliessman *et al.* 1981).

A medida que la agroecología se desarrollaba y su influencia crecía, ésta disciplina contribuyó al desarrollo del concepto de sostenibilidad en la agricultura. Por un lado, la idea de sostenibilidad fue como un objetivo que sirvió a la agroecología para definir y enfocar proyectos de investigación; y por otro lado, el enfoque agroecológico a nivel de sistema y las evidencias de su equilibrio dinámico retroalimentaron teórica y conceptualmente el concepto de sostenibilidad. En un simposio llevado a cabo en 1984, varios autores establecieron las bases ecológicas del concepto de sostenibilidad (Douglass 1984); esta publicación jugó un papel muy importante en la consolidación de la relación entre la investigación agroecológica y la labor de promover la agricultura sostenible.

Hoy, la agroecología continúa creciendo y unificando disciplinas. Por un lado, la ésta representa el estudio de los procesos ecológicos en los agroecosistemas; y por otro lado actúa como un agente de cambio que busca la transformación social y ecológica que debe ocurrir para que la agricultura se desarrolle realmente sobre bases sostenibles.

Trabajos Importantes durante el Desarrollo de la Agroecología

Año	Autor(es)	Título			
1928	K. Klages	"Crop ecology and ecological crop geography in the agronomic curriculum"	1978b	S. Gliessman	agroecosystems"
1938	J. Papadakis	Compendium of Crop Ecology	1979	R.D. Hart	Memorias del Seminario Regional sobre la Agricultura Tradicional Agroecosistemas: Conceptos Básicos
1939	H. Hanson	"Ecology in agriculture"	1979	G. Cox y M. Atkins	Agricultural Ecology: An Analysis of World Food Production Systems
1942	K. Klages	Ecological Crop Geography	1981	S. Gliessman, R. García-Espinoza, & M. Amador	"The ecological basis for the application of traditional agricultural technology in the management of tropical agroecosystems"
1956	G. Azzi	Agricultural Ecology	1983	M. Altieri	Agroecology
1962	C.P. Wilsie	Crop Adaptation and Distribution	1984	R. Lowrance, B. Stinner, G. House	Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts
1965	W. Tischler	Agrarökologie	1984	G. Douglass (ed.)	Agricultural Sustainability in a Changing World Order
1973	D.H. Janzen	"Tropical agroecosystems"			
1974	J. Harper	"The need for a focus on agro-ecosystems"			
1976	INTECOL	Report on an International Programme for Analysis of Agro-Ecosystems			
1977	O.L. Loucks	"Emergence of research on			

Ideas para Meditar

1. ¿Cómo permite el enfoque holístico de la agroecología la integración de los tres componentes más importantes de la sostenibilidad: bases ecológicas, viabilidad económica y equidad social?
2. ¿Por qué ha sido tan difícil para los seres humanos entender que la degradación ambiental causada por la agricultura convencional es consecuencia de la ausencia de un enfoque ecológico en la agricultura?
3. ¿Qué tienen en común la agronomía y la ecología con respecto a una agricultura sostenible?
4. ¿Cuáles son los aspectos más importantes que amenazan la sostenibilidad de la agricultura en el lugar donde vives?

Lecturas Recomendadas

- Altieri, M.A. 1995. *Agroecology: the Science of Sustainable Agriculture*. Third Edition. Westview Press: Boulder CO.
- Un trabajo pionero sobre la necesidad de disponer de una agricultura sostenible. Hace una revisión de los tipos de agroecosistemas que nos pueden conducir hacia la sostenibilidad.
- Brown, L. 1997. Facing the prospect of food scarcity. Pp23-41 en: Starke, L. (ed.) *State of the World 1997*. W.W. Norton & Co.: New York & London.
- Analiza ampliamente las causas que conducen a la crisis en la producción de alimentos a nivel mundial.
- Douglass, G.K. (ed.). 1984. *Agricultural Sustainability in a Changing World Order*. Westview Press: Boulder, CO.
- Memorias de un simposio que permitió definir la trayectoria y la naturaleza interdisciplinaria de trabajos sobre agricultura sostenible.

Edwards, C.L., R. Lal, P. Madden, R.H. Miller, and G. House (eds.) 1990. *Sustainable Agricultural Systems*. Soil and Water Conservation Society: Ankeny, IA.

Memorias de un importante simposio que reunió a investigadores y agricultores de diversas partes del mundo, interesados en agricultura sostenible, con el fin de intercambiar experiencias y perspectivas futuras.

Gliessman, S.R. (ed.). 1990. *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. Ecological Studies Series # 78. Springer-Verlag: New York.

Una excelente revisión acerca del tipo de investigación requerida para identificar las bases ecológicas necesarias para lograr agroecosistemas sostenibles.

Jackson, Wes, 1980. *New Roots for Agriculture*. Friends of the Earth: San Francisco.

Una excelente visión sobre de los fundamentos ecológicos y culturales de la agricultura renovable que se basa en la naturaleza como modelo para disponer de un manejo sostenible de agroecosistemas.

Jackson, W., W. Berry, and B. Colman. (eds.) 1986. *Meeting the Expectation of the Land*. Northpoint Press: Berkeley, CA.

Una colección de contribuciones de expertos, que tie-

nen el propósito de informar al público en general de los elementos culturales que se necesitan para lograr la transición de una agricultura convencional a una sostenible.

Miller, G.T., Jr., 1994. *Living in the Environment: Principles, Connections, and Solutions*. Eight Edition. Wadsworth: Belmont, CA.

Uno de los libros de texto, más actualizados en el tema de Ciencias Ambientales, con un enfoque de solución de problemas.

National Research Council. 1989. "Problems in US Agriculture", pp. 89-134 en *Alternative Agriculture*. National Academy Press: Washington, D.C.

Una excelente revisión de la situación actual de la agricultura en los Estados Unidos y la viabilidad futura de las alternativas propuestas. Se apoya en una serie de estudios de caso exitosos relacionados con manejos alternativos de sistemas agrícolas en todo el país.

Pretty, Jules N. 1995. *Regenerating Agriculture: Policies and Practice for Sustainability and Self-Reliance*. Joseph Henry Press: Washington, D.C.

Una revisión extensiva sobre la necesidad de cambiar los lineamientos de las prácticas y políticas agrícolas, así como los pasos que se han dado para facilitar el cambio.

EL CONCEPTO DE AGROECOSISTEMAS

Un **agroecosistema** es un sitio de producción agrícola, por ejemplo una granja, visto como un ecosistema. El concepto de agroecosistema ofrece un marco de referencia para analizar sistemas de producción de alimentos en su totalidad, incluyendo el complejo conjunto de entradas y salidas y las interacciones entre sus partes.

Debido a que el concepto de agroecosistema se basa en principios ecológicos y en nuestro entendimiento de los ecosistemas naturales, el primer tema de análisis en este capítulo es el ecosistema. Examinaremos los aspectos estructurales de los ecosistemas –sus partes y las relaciones entre los mismos– posteriormente analizaremos las funciones de esas partes. Así, los agroecosistemas serán comparados, estructural y funcionalmente, con sus contrapartes, los ecosistemas naturales.

Los principios y términos usados en este capítulo son incluidos en la discusión de agroecosistemas en todo el libro.

LA ESTRUCTURA DE LOS ECOSISTEMAS NATURALES

Un **ecosistema** puede ser definido como un sistema funcional de relaciones complementarias entre los organismos vivos y su ambiente, delimitado por criterios arbitrarios, los cuales en espacio y tiempo parecen mantener un equilibrio dinámico. Así, un ecosistema tiene partes físicas con relaciones particulares –la *estructura* del sistema– que en su conjunto forman parte de procesos dinámicos –la *función* del ecosistema.

Los **factores bióticos** son organismos vivos que interactúan con el ambiente y los **factores abióticos**, componentes físicos y químicos del ambiente como el

suelo, la luz y la temperatura, son los componentes estructurales básicos del ecosistema.

Niveles de Organización

Los ecosistemas pueden examinarse en términos de una composición jerárquica de sus partes, tal y como el cuerpo humano puede examinarse a nivel de moléculas, células, tejidos, órganos, o sistema de órganos. El nivel más simple es el **individuo**. El estudio de este nivel de organización se llama autoecología o ecofisiología, campo que se ocupa de estudiar cómo se desenvuelve un individuo de una especie en respuesta a los factores ambientales, así como su tolerancia a los factores ambientales de estrés que determinan dónde podrá establecerse. Por ejemplo, las adaptaciones de la planta de plátano la restringen a los ambientes tropicales húmedos, con una serie de condiciones específicas, mientras que la fresa está adaptada a un ambiente mucho más templado.

El siguiente nivel de organización corresponde a grupos de individuos de la misma especie, formando así una **población**. El estudio de éstas es llamado ecología de poblaciones. Su entendimiento es importante para poder determinar y comprender los factores que controlan el tamaño y crecimiento de las poblaciones, especialmente lo concerniente a la capacidad del ambiente para soportar una población determinada a través del tiempo. Los agrónomos han aplicado los principios de la ecología de poblaciones para determinar la densidad óptima de cultivo para obtener el rendimiento máximo, así como también para determinar la distribución espacial más adecuada de éstos en el campo.

En la naturaleza, las poblaciones de diferentes especies normalmente se encuentran mezcladas en el

espacio y el tiempo. Así, se crea el siguiente nivel de organización, la **comunidad**. Una comunidad es un conjunto de varias especies coexistiendo e interactuando juntas en un lugar específico. Un aspecto importante de este nivel es cómo la interacción de los organismos afecta la distribución y la abundancia de las diferentes especies que componen una comunidad. La competencia entre plantas en un sistema de cultivo o la depredación de áfidos por sus enemigos naturales, son ejemplos de interacción en un agroecosistema. El estudio del nivel de organización conocido como comunidad se denomina ecología de comunidades.

El más global de los niveles de organización de un ecosistema es el **ecosistema** en sí, el cual incluye todos los factores abióticos del ambiente en adición a las comunidades de organismos presentes en un área específica. Una intrincada red de interacciones ocurre dentro de la estructura de un ecosistema.

Esos cuatro niveles pueden ser aplicados directamente a los agroecosistemas, tal y como se muestra en la Figura 2.1. A lo largo de este texto se harán referencias a esos niveles: plantas a nivel individual (nivel organismo), poblaciones del cultivo o de otras especies, comunidades dentro de la granja y todo el agroecosistema.

Una característica importante de los ecosistemas es que en cada nivel de organización, hay propiedades que emergen y que no existen en el nivel anterior. Esas **propiedades emergentes** son el resultado de la interacción de las partes en cada nivel de organización del ecosistema. Por ejemplo, una población es mucho más que el conjunto de individuos de la misma especie, tiene características que no pueden ser entendidas en términos de cada organismo por sí mismo. En el contexto de un agroecosistema, este principio quiere decir en esencia, que una granja es mucho más que la suma de las plantas. La sostenibilidad puede considerarse como la cualidad última que emerge de un enfoque de ecosistema hacia la agricultura.

Propiedades Estructurales de las Comunidades

Una comunidad es el resultado de la adaptación de las especies que la componen, a los gradientes de los factores abióticos ambientales y, por otro lado, es el resultado de las interacciones entre las poblaciones de las especies que la componen. Debido a que la estructura

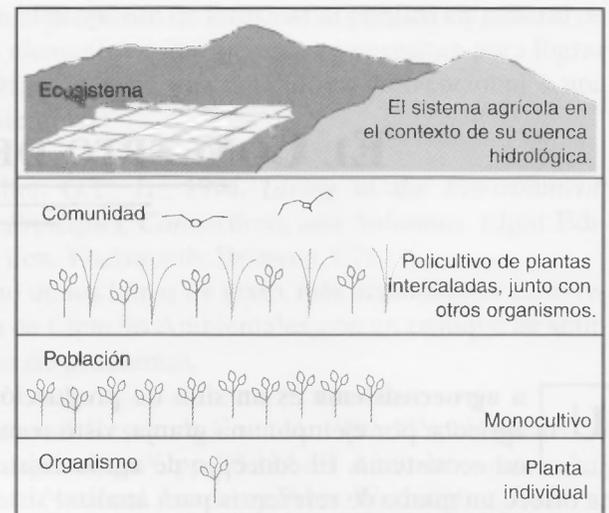


FIGURA 2.1

Niveles de organización de un ecosistema aplicado a un agroecosistema. El diagrama podría ser ampliado hasta incluir niveles de organización regional, nacional y global, lo cual involucraría aspectos de mercado, políticas agrícolas, incluso cambio climático global. Si la expansión es en otro sentido, podrían incluirse niveles de organización celular, químico y atómico.

de la comunidad juega un papel importante en la determinación de la dinámica y la estabilidad de un ecosistema, es importante examinar con mayor detalle las propiedades que surgen como resultado de las interacciones que ocurren en este nivel de organización.

Diversidad de Especies

En el sentido más simple, la **diversidad de especies** es el número de especies presentes en una comunidad. Algunas comunidades, como las de un estanque de agua dulce, poseen gran diversidad, mientras que otras comunidades tienen muy poca diversidad de especies.

Dominancia y Abundancia Relativa

En cualquier comunidad, algunas especies son más abundantes que otras. La especie que tiene el mayor impacto sobre los componentes bióticos y abióticos de la comunidad se considera la **especie dominante**.

La **dominancia** puede ser el resultado de la abundancia relativa de un organismo, su tamaño, su papel ecológico, o cualquier combinación de estos factores. Por ejemplo, debido a que unos cuantos árboles en un jardín pueden alterar dramáticamente la incidencia de luz hacia las otras especies, pueden ser considerados como la especie dominante aún cuando no sea la más numerosa. Frecuentemente, los ecosistemas naturales son llamados como su especie dominante. La comunidad de pino-encino en el bosque de los altos de Chiapas es un ejemplo de lo anterior.

Estructura de la Vegetación

Las comunidades terrestres a menudo son caracterizadas por la estructura de su vegetación. Esto se determina principalmente por la especie dominante y/o la forma y abundancia de otras especies y su distribución espacial. Así, la estructura vegetal dispone de un componente vertical (un perfil con diferentes estratos) y otro componente horizontal (patrones de asociación). Diferentes especies ocupan diferentes espacios en esta estructura. Cuando las especies que componen una estructura vegetal tienen una forma similar de crecimiento, se usan nombres bastante generales para su denominación (por ejemplo pastizales seiva, matorral).

Estructura Trófica

Cada una de las especies en una comunidad tiene necesidades nutricionales. La forma en que esas necesidades se satisfacen en relación con otras especies, determina la estructura de las interrelaciones. Así se forma la **estructura trófica** de una comunidad. Las plantas son la base de toda estructura trófica, por su habilidad para capturar energía solar y convertirla mediante la fotosíntesis en **biomasa**, la cual sirve de alimento para otras especies. Debido a esta propie-

dad, a las plantas se les conoce como **productores primarios** y se ubican en la base de la estructura trófica. Fisiológicamente a las plantas se les conoce como **organismos autótrofos**, ya que pueden satisfacer sus necesidades energéticas sin consumir ningún otro organismo.

La biomasa producida por las plantas puede ser usada por otros organismos de la comunidad conocidos como **consumidores**. Este grupo incluye a los **herbívoros**, quienes convierten la biomasa vegetal en biomasa animal, a los **depredadores** y **parásitos**, quienes se alimentan de los herbívoros y los **parasitoides**, quienes se alimentan de predadores y parásitos. Todos estos consumidores son clasificados como **heterótrofos**, debido a que sus necesidades alimenticias son satisfechas al consumir otros organismos.

Cada nivel de consumo se considera como un **nivel trófico**. Las relaciones tróficas que suceden dentro de una comunidad pueden ser descritas como cadena alimenticia o red alimenticia, dependiendo de su complejidad. Como veremos más adelante, las relaciones tróficas pueden ser bastante complejas y su entendimiento es de gran importancia y aplicación en agroecosistemas, por ejemplo para el manejo de plagas y enfermedades.

Estabilidad

A través del tiempo, la diversidad de especies, la estructura dominante, la estructura vegetativa y la estructura trófica de una comunidad, permanecen relativamente estables, aún cuando algunos individuos mueren o abandonen el área y el tamaño relativo de sus poblaciones cambie. En otras palabras, si usted visita un área hoy y lo hace 20 años más tarde, probablemente le parecerá relativamente igual en sus aspectos básicos. Aún cuando algún tipo de **perturbación** -como fuego, inundación, etc- haya provocado la muerte de varias especies de la comunidad, ésta even-

CUADRO 2.1 Niveles tróficos y su papel en una comunidad

Tipo de organismo	Papel trófico	Nivel trófico	Clasificación fisiológica
Plantas	Productores	Primario	Autótrófico
Herbívoros	Consumidor primario	Secundario	Heterotrófico
Depredadores y parásitos	Consumidores secundarios o mayores	Terciario y más alto	Heterotrófico

tualmente se recuperará y volverá a tener una composición similar a la original, antes de la perturbación.

Debido a la habilidad de las comunidades para resistir cambios y regresar a un estado semejante al original cuando son perturbadas, se considera que las comunidades y los ecosistemas de los que forman parte, poseen la propiedad de estabilidad. La relativa estabilidad de una comunidad depende en gran parte del tipo de comunidad y la naturaleza de la perturbación. Los ecólogos no están en completo acuerdo si se debe considerar que la estabilidad es una propiedad inherente de la comunidad o de los ecosistemas.

FUNCIONAMIENTO DE LOS ECOSISTEMAS NATURALES

El funcionamiento de los ecosistemas se refiere al proceso dinámico que ocurre en su interior: el movimiento de materia y energía y las interacciones y relaciones de los organismos y materiales en el sistema. Es importante entender estos procesos para abordar el concepto de dinámica de ecosistemas, eficiencia, productividad y desarrollo. Esto es especialmente importante en agroecosistemas ya que la función puede marcar la diferencia entre el éxito o el fracaso de un

cultivo o de una práctica de manejo.

Los dos procesos fundamentales en cualquier ecosistema son el flujo de energía entre las partes y el ciclo de nutrientes.

Flujo de Energía

Cada individuo en un ecosistema usa constantemente energía para llevar a cabo sus procesos fisiológicos, por lo tanto, sus fuentes de energía deben ser continuamente renovadas. La energía en un ecosistema es como la electricidad en una casa: fluye constantemente dentro del sistema a partir de fuentes externas, permitiendo así su funcionamiento. El flujo de energía en un ecosistema está directamente relacionado con su estructura trófica. Al examinar el flujo de energía, el enfoque es hacia sus fuentes y su movimiento, más que en la estructura por sí misma.

La energía que fluye dentro de un ecosistema es el resultado de la captura de la energía solar por las plantas, las productoras del sistema. Así, la energía se mantiene almacenada en las estructuras químicas de la biomasa que las plantas producen. Los ecosistemas varían en su capacidad de convertir la energía solar en biomasa. Nosotros podemos medir la cantidad total de energía que las plantas han incorporado

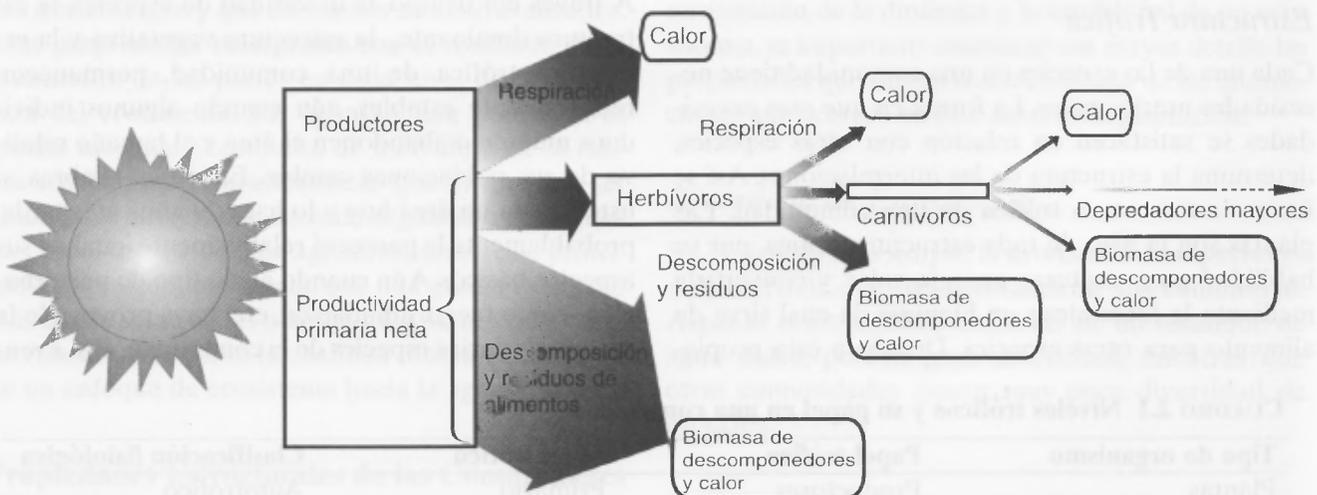


FIGURA 2.2

Flujo de energía en el ecosistema. El tamaño de cada caja representa la cantidad relativa de energía que fluye a través de ese nivel trófico. En un ecosistema promedio, aproximadamente el 10% de la energía es transferida de un nivel trófico a otro. Casi toda la energía que ingresa al sistema eventualmente se disipa en forma de calor.

al sistema en un momento determinado estimando el peso de la biomasa de la **cosecha en pie**. También podemos medir la tasa de conversión de energía solar a biomasa, este proceso se llama **productividad primaria bruta**, la cual se expresa usualmente en términos de kcal/m²/año. Cuando la energía que usa la planta para su propio mantenimiento se sustrae de la productividad primaria bruta, se obtiene la **productividad primaria neta**.

Los herbívoros (consumidores primarios) se alimentan de la biomasa vegetal y la convierten en biomasa animal, los depredadores y parásitos que se alimentan de los herbívoros u otros consumidores conforman el grupo de consumidores secundarios, terciarios, etc., continuando así el proceso de conversión de biomasa en otros niveles tróficos. Sin embargo, solamente un pequeño porcentaje de la biomasa de un nivel trófico se convierte en biomasa en el siguiente nivel trófico. Esto se debe a que gran cantidad de la energía consumida, hasta el 90%, es utilizada para el funcionamiento del organismo en cada nivel trófico. Adicionalmente, otra importante cantidad de biomasa en cada uno de los niveles no es consumida (y parte de la que es consumida no es digerida totalmente), esta biomasa en forma de materia muerta y/o fecal es consumida eventualmente por los organismos **detritívoros y descomponedores**. El proceso de descomposición libera en forma de calor mucha de la energía que fue utilizada en la formación de la biomasa y la restante se incorpora al suelo como materia orgánica.

La energía que abandona al ecosistema natural es principalmente en forma de calor, generado en parte por la respiración de los organismos de los diferentes niveles tróficos y por la actividad de descomposición de la biomasa. La cantidad total de energía que abandona el sistema usualmente es similar a la energía solar capturada en la biomasa de las plantas.

Ciclo de Nutrientos

En adición a la energía, los organismos requieren entradas de materia para mantener sus funciones vitales. Esta materia – en forma de nutrientes que contienen una variedad de elementos y compuestos cruciales – es usada para formar células, tejidos y las complejas moléculas orgánicas que se requieren para el funcionamiento de células y organismos.

El ciclo de nutrientes en un ecosistema está conectado con el flujo de energía: la biomasa transferida de un nivel trófico a otro contiene tanto energía como nutrientes. La energía, sin embargo, fluye en los ecosistemas en una sola dirección – sol, productores, consumidores, atmósfera. En contraste, los nutrientes se mueven en ciclos – pasando de los componentes bióticos a los abióticos y regresando a los bióticos. Debido a que tanto los componentes bióticos como abióticos están involucrados en este proceso, estos se denominan **ciclos biogeoquímicos**. Como un todo, los ciclos biogeoquímicos son complejos e interconectados, adicionalmente muchos ocurren a escala global, trascendiendo así los ecosistemas individuales.

Muchos nutrientes son reciclados en el ecosistema. Los nutrientes más importantes son: carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O), fósforo (P), azufre (S) y agua. Con excepción del agua, cada uno de estos se conocen como **macronutrientes**. Dependiendo del elemento y la estructura trófica del ecosistema, cada nutriente sigue una ruta específica; sin embargo, se conoce la existencia de dos tipos básicos de ciclos biogeoquímicos. Para el carbono, el oxígeno y el nitrógeno, la atmósfera funciona como un banco de reserva abiótico, de tal modo que podemos visualizar ciclos a nivel global. Una molécula de dióxido de carbono exhalado por un organismo en un lugar cualquiera, puede ser incorporada en la biomasa de una planta localizada en el lado opuesto del planeta.

Otros elementos son menos móviles y se reciclan más localmente dentro de un ecosistema, por ejemplo el fósforo, azufre, potasio, calcio (Ca) y la mayoría de los **micronutrientes**. Esto se debe principalmente a que el suelo es su principal banco de reserva abiótica. Estos nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas, almacenados por cierto tiempo en la biomasa y eventualmente, retornan al suelo por la actividad de los organismos descomponedores.

Algunos nutrientes pueden existir en formas que son fácilmente disponibles para los organismos. El carbono es un ejemplo de lo anterior, ya que se mueve fácilmente de su forma abiótica en la atmósfera, ejemplo CO₂, a la forma biótica, ejemplo carbohidratos en las plantas o animales durante su ciclo. El tiempo de permanencia del carbono en la materia viva, muerta o como humus en el suelo varía mucho, pero para ser reincorporado en forma de biomasa,

FIGURA 2.3
El ciclo del carbono.

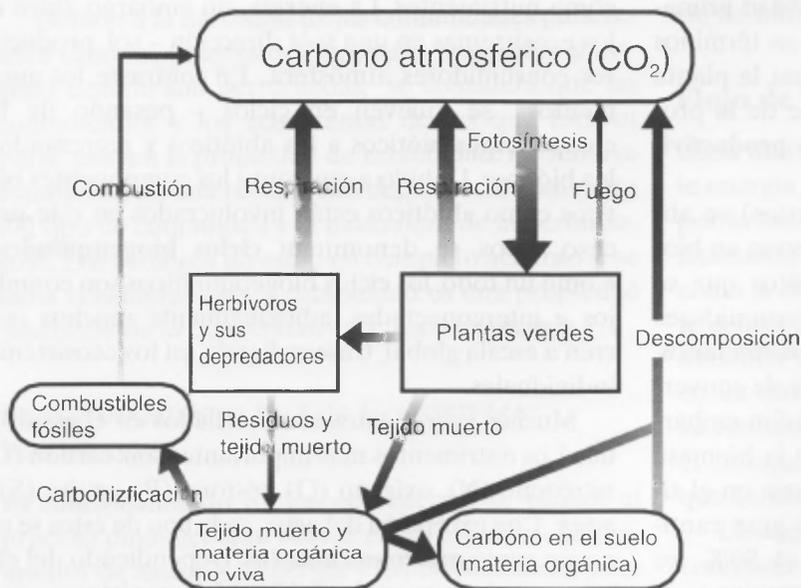
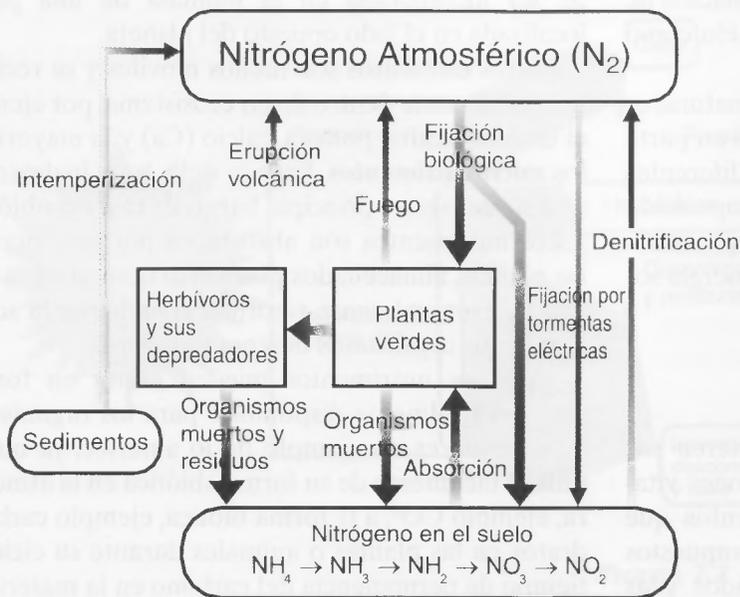


FIGURA 2.4
El ciclo del nitrógeno.



debe retornar a la atmósfera en forma de CO₂. La Figura 2.3 muestra en forma simplificada el ciclo del carbono enfocado a sistemas terrestres y sin mostrar las reservas de este nutrimento en forma de rocas de carbonato.

En la atmósfera, los nutrimentos existen en formas poco disponibles para ser utilizados, de modo que deben convertirse en otras formas antes de ser utilizados. Un ejemplo es el nitrógeno atmosférico (N₂). La conversión del N₂ a amonio (NH₃) se logra mediante un proceso de fijación biológica por microorganismos. Así se inicia el proceso que convierte al N₂ en una forma disponible para las plantas. Una vez incorporado en la biomasa vegetal, este nitrógeno fijado puede ser parte de la reserva del suelo y eventualmente, puede ser absorbido por las plantas en forma de nitrato (NO₃). En tanto que este nitrógeno no abandone el sistema en forma de gas como amonio u óxido de nitrógeno, este nutrimento puede ser reciclado dentro del ecosistema. La importancia agroecológica de este proceso se discute con más detalle en el Capítulo 16.

Por otro lado, el fósforo no tiene una forma gaseosa significativa. Este se incorpora lentamente al suelo debido a la intemperización de ciertas rocas. Una vez en el suelo, puede ser absorbido por las plantas en forma de fosfatos y formar parte de la biomasa viva, o puede retornar al suelo por la vía de excreciones o descomposición de la biomasa. Este ciclo que involucra a organismos y suelo, tiende a ser muy localizado en un ecosistema, excepto cuando los fosfatos que no son absorbidos tienden a lixiviar, abandonan el ecosistema, llegan al manto freático

y terminan en el océano. Una vez en el océano para que esa molécula de P pueda reciclarse puede ser del orden de tiempo geológico; así aquí la importancia de mantener el fósforo en el ecosistema.

En adición a los macronutrientes, otros elementos químicos deben estar presentes y disponibles en el ecosistema para que las plantas puedan desarrollarse. Aún cuando estos elementos son requeridos en pequeñas cantidades, son de gran importancia para los organismos. Entre esos elementos considerados como **micronutrientes** están el hierro (Fe), magnesio (Mg), manganeso (Mn), cobalto (Co), boro (B), zinc (Zn) y el molibdeno (Mo).

Tanto los macro como los micronutrientes son absorbidos por los organismos y almacenados en la biomasa viva o materia orgánica. En caso de que algún elemento en particular se pierda o se remueva del sistema en cantidades significativas, se puede convertir en un factor limitante para el buen desarrollo de un organismo. Los componentes biológicos de cada sistema son importantes para determinar la eficiencia del movimiento de los nutrientes, un sistema eficiente minimiza las pérdidas y maximiza el reciclaje. Esto es relevante ya que la productividad del sistema puede estar directamente relacionada con la eficiencia en que los nutrientes son reciclados.

Mecanismos de Regulación de Poblaciones

El tamaño de las poblaciones y de los individuos que las integran cambia regularmente, esto provoca fluctuaciones dinámicas a través del tiempo. La demografía de cada población está en función de la tasa de nacimiento y mortalidad de la especie en cuestión, de la tasa de incremento o disminución y de la capacidad de carga del ambiente donde vive. El tamaño de una población también depende de la relación que tenga con otras poblaciones del ecosistema y con el ambiente. Una especie con una tolerancia a un amplio espectro de condiciones ambientales y de interacciones con otras especies será prácticamente común en un área geográfica relativamente grande. En contraste, aquellas especializadas a ciertas condiciones ambientales, serán especies de ubicación local o restringida.

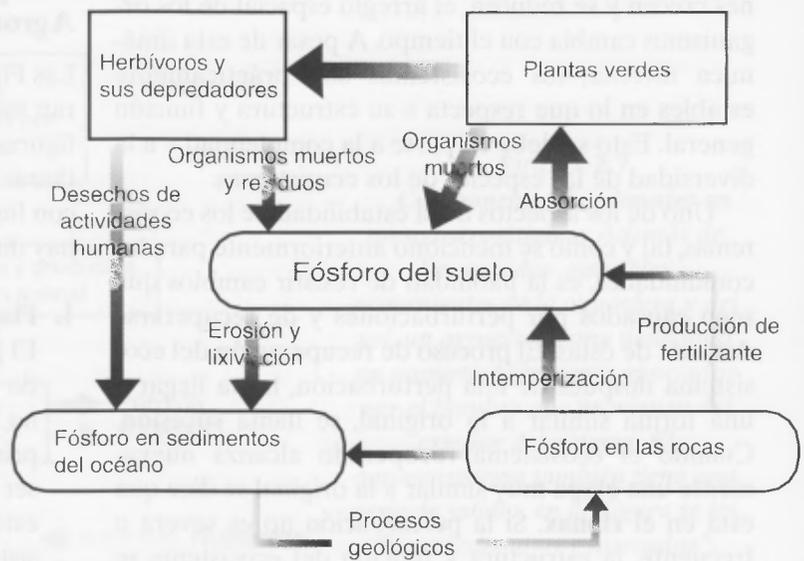


FIGURA 2.5
El Ciclo del fósforo.

El resultado de la interacción de una población con otra depende de la serie de adaptaciones que cada especie posee. Cuando la adaptación es muy similar y los recursos son insuficientes para mantener ambas poblaciones, entonces puede ocurrir **competencia**. Una especie puede dominar a otra mediante la remoción de elementos sustanciales del ambiente. En otros casos, una especie puede adicionar sustancias al ambiente, modificando las condiciones existentes de modo tal que pueda establecer su dominio en detrimento de otras especies. Algunas especies se han adaptado en una forma de coexistencia benéfica llamada **mutualismo**, donde los recursos son compartidos o repartidos (El Capítulo 15 discute la importancia del mutualismo en los agroecosistemas). En ecosistemas naturales, la selección natural lograda a través del tiempo tiene como resultado las estructuras biológicas más complejas posibles dentro de los límites establecidos por el ambiente; esto permite tanto el establecimiento como el mantenimiento dinámico de las poblaciones.

Cambios en el Ecosistema

Los ecosistemas se encuentran en un estado dinámico de constantes cambios. Los organismos nacen, crecen, se reproducen y mueren, la materia se recicla a través de los componentes del sistema, las poblacio-

La dominancia puede ser el resultado de la abundancia relativa de un organismo, su tamaño, su papel ecológico, o cualquier combinación de estos factores. Por ejemplo, debido a que unos cuantos árboles en un jardín pueden alterar dramáticamente la incidencia de luz hacia las otras especies, pueden ser considerados como la especie dominante aún cuando no sea la más numerosa. Frecuentemente, los ecosistemas naturales son llamados como su especie dominante. La comunidad de pino-encino en el bosque de los altos de Chiapas es un ejemplo de lo anterior.

Estructura de la Vegetación

Las comunidades terrestres a menudo son caracterizadas por la estructura de su vegetación. Esto se determina principalmente por la especie dominante y/o la forma y abundancia de otras especies y su distribución espacial. Así, la estructura vegetal dispone de un componente vertical (un perfil con diferentes estratos) y otro componente horizontal (patrones de asociación). Diferentes especies ocupan diferentes espacios en esta estructura. Cuando las especies que componen una estructura vegetal tienen una forma similar de crecimiento, se usan nombres bastante generales para su denominación (por ejemplo pastizales, selva, matorral).

Estructura Trófica

Cada una de las especies en una comunidad tiene necesidades nutricionales. La forma en que esas necesidades se satisfacen en relación con otras especies, determina la estructura de las interrelaciones. Así se forma la **estructura trófica** de una comunidad. Las plantas son la base de toda estructura trófica, por su habilidad para capturar energía solar y convertirla mediante la fotosíntesis en **biomasa**, la cual sirve de alimento para otras especies. Debido a esta propie-

dad, a las plantas se les conoce como **productores primarios** y se ubican en la base de la estructura trófica. Fisiológicamente a las plantas se les conoce como **organismos autótrofos**, ya que pueden satisfacer sus necesidades energéticas sin consumir ningún otro organismo.

La biomasa producida por las plantas puede ser usada por otros organismos de la comunidad conocidos como **consumidores**. Este grupo incluye a los **herbívoros**, quienes convierten la biomasa vegetal en biomasa animal, a los **depredadores** y **parásitos**, quienes se alimentan de los herbívoros y los **parasitoides**, quienes se alimentan de predadores y parásitos. Todos estos consumidores son clasificados como **heterótrofos**, debido a que sus necesidades alimenticias son satisfechas al consumir otros organismos.

Cada nivel de consumo se considera como un **nivel trófico**. Las relaciones tróficas que suceden dentro de una comunidad pueden ser descritas como cadena alimenticia o red alimenticia, dependiendo de su complejidad. Como veremos más adelante, las relaciones tróficas pueden ser bastante complejas y su entendimiento es de gran importancia y aplicación en agroecosistemas, por ejemplo para el manejo de plagas y enfermedades.

Estabilidad

A través del tiempo, la diversidad de especies, la estructura dominante, la estructura vegetativa y la estructura trófica de una comunidad, permanecen relativamente estables, aún cuando algunos individuos mueren o abandonen el área y el tamaño relativo de sus poblaciones cambie. En otras palabras, si usted visita un área hoy y lo hace 20 años más tarde, probablemente le parecerá relativamente igual en sus aspectos básicos. Aún cuando algún tipo de **perturbación** -como fuego, inundación, etc- haya provocado la muerte de varias especies de la comunidad, ésta even-

CUADRO 2.1 Niveles tróficos y su papel en una comunidad

Tipo de organismo	Papel trófico	Nivel trófico	Clasificación fisiológica
Plantas	Productores	Primario	Autotrófico
Herbívoros	Consumidor primario	Secundario	Heterotrófico
Depredadores y parásitos	Consumidores secundarios o mayores	Terciario y más alto	Heterotrófico

al sistema en un momento determinado estimando el peso de la biomasa de la **cosecha en pie**. También podemos medir la tasa de conversión de energía solar a biomasa, este proceso se llama **productividad primaria bruta**, la cual se expresa usualmente en términos de kcal/m²/año. Cuando la energía que usa la planta para su propio mantenimiento se sustrae de la productividad primaria bruta, se obtiene la **productividad primaria neta**.

Los herbívoros (consumidores primarios) se alimentan de la biomasa vegetal y la convierten en biomasa animal, los depredadores y parásitos que se alimentan de los herbívoros u otros consumidores conforman el grupo de consumidores secundarios, terciarios, etc., continuando así el proceso de conversión de biomasa en otros niveles tróficos. Sin embargo, solamente un pequeño porcentaje de la biomasa de un nivel trófico se convierte en biomasa en el siguiente nivel trófico. Esto se debe a que gran cantidad de la energía consumida, hasta el 90%, es utilizada para el funcionamiento del organismo en cada nivel trófico. Adicionalmente, otra importante cantidad de biomasa en cada uno de los niveles no es consumida (y parte de la que es consumida no es digerida totalmente), esta biomasa en forma de materia muerta y/o fecal es consumida eventualmente por los organismos **detritívoros y descomponedores**. El proceso de descomposición libera en forma de calor mucha de la energía que fue utilizada en la formación de la biomasa y la restante se incorpora al suelo como materia orgánica.

La energía que abandona al ecosistema natural es principalmente en forma de calor, generado en parte por la respiración de los organismos de los diferentes niveles tróficos y por la actividad de descomposición de la biomasa. La cantidad total de energía que abandona el sistema usualmente es similar a la energía solar capturada en la biomasa de las plantas.

Ciclo de Nutrientos

En adición a la energía, los organismos requieren entradas de materia para mantener sus funciones vitales. Esta materia – en forma de nutrientes que contienen una variedad de elementos y compuestos cruciales – es usada para formar células, tejidos y las complejas moléculas orgánicas que se requieren para el funcionamiento de células y organismos.

El ciclo de nutrientes en un ecosistema está conectado con el flujo de energía: la biomasa transferida de un nivel trófico a otro contiene tanto energía como nutrientes. La energía, sin embargo, fluye en los ecosistemas en una sola dirección – sol, productores, consumidores, atmósfera. En contraste, los nutrientes se mueven en ciclos – pasando de los componentes bióticos a los abióticos y regresando a los bióticos. Debido a que tanto los componentes bióticos como abióticos están involucrados en este proceso, estos se denominan **ciclos biogeoquímicos**. Como un todo, los ciclos biogeoquímicos son complejos e interconectados, adicionalmente muchos ocurren a escala global, trascendiendo así los ecosistemas individuales.

Muchos nutrientes son reciclados en el ecosistema. Los nutrientes más importantes son: carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O), fósforo (P), azufre (S) y agua. Con excepción del agua, cada uno de estos se conocen como **macronutrientes**. Dependiendo del elemento y la estructura trófica del ecosistema, cada nutriente sigue una ruta específica; sin embargo, se conoce la existencia de dos tipos básicos de ciclos biogeoquímicos. Para el carbono, el oxígeno y el nitrógeno, la atmósfera funciona como un banco de reserva abiótico, de tal modo que podemos visualizar ciclos a nivel global. Una molécula de dióxido de carbono exhalado por un organismo en un lugar cualquiera, puede ser incorporada en la biomasa de una planta localizada en el lado opuesto del planeta.

Otros elementos son menos móviles y se reciclan más localmente dentro de un ecosistema, por ejemplo el fósforo, azufre, potasio, calcio (Ca) y la mayoría de los **micronutrientes**. Esto se debe principalmente a que el suelo es su principal banco de reserva abiótica. Estos nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas, almacenados por cierto tiempo en la biomasa y eventualmente, retornan al suelo por la actividad de los organismos descomponedores.

Algunos nutrientes pueden existir en formas que son fácilmente disponibles para los organismos. El carbono es un ejemplo de lo anterior, ya que se mueve fácilmente de su forma abiótica en la atmósfera, ejemplo CO₂, a la forma biótica, ejemplo carbohidratos en las plantas o animales durante su ciclo. El tiempo de permanencia del carbono en la materia viva, muerta o como humus en el suelo varía mucho, pero para ser reincorporado en forma de biomasa,

y terminan en el océano. Una vez en el océano, para que esa molécula de P pueda reciclarse puede ser del orden de tiempo geológico; he aquí la importancia de mantener el fósforo en el ecosistema.

En adición a los macronutrientes, otros elementos químicos deben estar presentes y disponibles en el ecosistema para que las plantas puedan desarrollarse. Aún cuando estos elementos son requeridos en pequeñas cantidades, son de gran importancia para los organismos. Entre esos elementos considerados como **micronutrientes** están el hierro (Fe), magnesio (Mg), manganeso (Mn), cobalto (Co), boro (Bo), zinc (Zn) y el molibdeno (Mo).

Tanto los macro como los micronutrientes son absorbidos por los organismos y almacenados en la biomasa viva o materia orgánica. En caso de que algún elemento en particular se pierda o se remueva del sistema en cantidades significativas, se puede convertir en un factor limitante para el buen desarrollo de un organismo. Los componentes biológicos de cada sistema son importantes para determinar la eficiencia del movimiento de los nutrientes, un sistema eficiente minimiza las pérdidas y maximiza el reciclaje. Esto es relevante ya que la productividad del sistema puede estar directamente relacionada con la eficiencia en que los nutrientes son reciclados.

Mecanismos de Regulación de Poblaciones

El tamaño de las poblaciones y de los individuos que las integran cambia regularmente, esto provoca fluctuaciones dinámicas a través del tiempo. La demografía de cada población está en función de la tasa de nacimiento y mortalidad de la especie en cuestión, de la tasa de incremento o disminución y de la capacidad de carga del ambiente donde vive. El tamaño de una población también depende de la relación que tenga con otras poblaciones del ecosistema y con el ambiente. Una especie con una tolerancia a un amplio espectro de condiciones ambientales y de interacciones con otras especies será prácticamente común en un área geográfica relativamente grande. En contraste, aquellas especializadas a ciertas condiciones ambientales, serán especies de ubicación local o restringida.

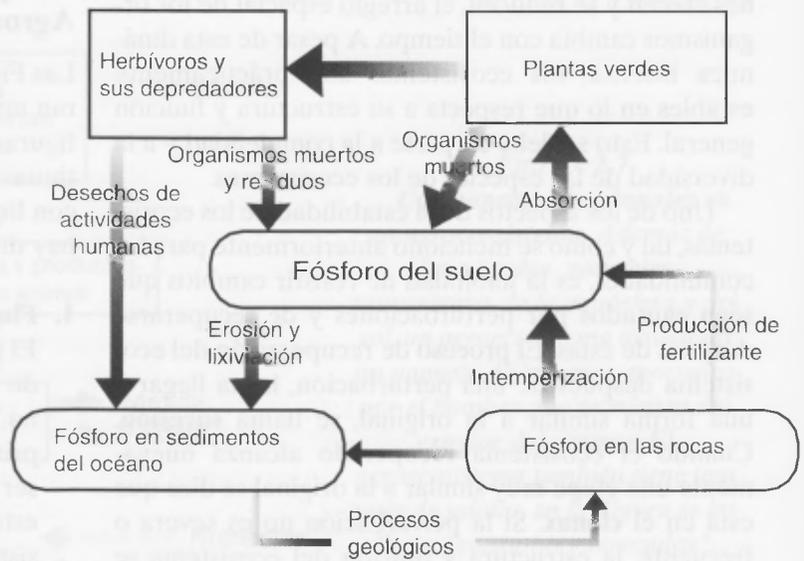


FIGURA 2.5
El Ciclo del fósforo.

El resultado de la interacción de una población con otra depende de la serie de adaptaciones que cada especie posee. Cuando la adaptación es muy similar y los recursos son insuficientes para mantener ambas poblaciones, entonces puede ocurrir **competencia**. Una especie puede dominar a otra mediante la remoción de elementos sustanciales del ambiente. En otros casos, una especie puede adicionar sustancias al ambiente, modificando las condiciones existentes de modo tal que pueda establecer su dominio en detrimento de otras especies. Algunas especies se han adaptado en una forma de coexistencia benéfica llamada **mutualismo**, donde los recursos son compartidos o repartidos (El Capítulo 15 discute la importancia del mutualismo en los agroecosistemas). En ecosistemas naturales, la selección natural lograda a través del tiempo tiene como resultado las estructuras biológicas más complejas posibles dentro de los límites establecidos por el ambiente; esto permite tanto el establecimiento como el mantenimiento dinámico de las poblaciones.

Cambios en el Ecosistema

Los ecosistemas se encuentran en un estado dinámico de constantes cambios. Los organismos nacen, crecen, se reproducen y mueren, la materia se recicla a través de los componentes del sistema, las poblacio-

La **dominancia** puede ser el resultado de la abundancia relativa de un organismo, su tamaño, su papel ecológico, o cualquier combinación de estos factores. Por ejemplo, debido a que unos cuantos árboles en un jardín pueden alterar dramáticamente la incidencia de luz hacia las otras especies, pueden ser considerados como la especie dominante aún cuando no sea la más numerosa. Frecuentemente, los ecosistemas naturales son llamados como su especie dominante. La comunidad de pino-encino en el bosque de los altos de Chiapas es un ejemplo de lo anterior.

Estructura de la Vegetación

Las comunidades terrestres a menudo son caracterizadas por la estructura de su vegetación. Esto se determina principalmente por la especie dominante y/o la forma y abundancia de otras especies y su distribución espacial. Así, la estructura vegetal dispone de un componente vertical (un perfil con diferentes estratos) y otro componente horizontal (patrones de asociación). Diferentes especies ocupan diferentes espacios en esta estructura. Cuando las especies que componen una estructura vegetal tienen una forma similar de crecimiento, se usan nombres bastante generales para su denominación (por ejemplo pastizales, selva, matorral).

Estructura Trófica

Cada una de las especies en una comunidad tiene necesidades nutricionales. La forma en que esas necesidades se satisfacen en relación con otras especies, determina la estructura de las interrelaciones. Así se forma la **estructura trófica** de una comunidad. Las plantas son la base de toda estructura trófica, por su habilidad para capturar energía solar y convertirla mediante la fotosíntesis en **biomasa**, la cual sirve de alimento para otras especies. Debido a esta propie-

dad, a las plantas se les conoce como **productores primarios** y se ubican en la base de la estructura trófica. Fisiológicamente a las plantas se les conoce como **organismos autótrofos**, ya que pueden satisfacer sus necesidades energéticas sin consumir ningún otro organismo.

La biomasa producida por las plantas puede ser usada por otros organismos de la comunidad conocidos como **consumidores**. Este grupo incluye a los **herbívoros**, quienes convierten la biomasa vegetal en biomasa animal, a los **depredadores** y **parásitos**, quienes se alimentan de los herbívoros y los **parasitoides**, quienes se alimentan de predadores y parásitos. Todos estos consumidores son clasificados como **heterótrofos**, debido a que sus necesidades alimenticias son satisfechas al consumir otros organismos.

Cada nivel de consumo se considera como un **nivel trófico**. Las relaciones tróficas que suceden dentro de una comunidad pueden ser descritas como cadena alimenticia o red alimenticia, dependiendo de su complejidad. Como veremos más adelante, las relaciones tróficas pueden ser bastante complejas y su entendimiento es de gran importancia y aplicación en agroecosistemas, por ejemplo para el manejo de plagas y enfermedades.

Estabilidad

A través del tiempo, la diversidad de especies, la estructura dominante, la estructura vegetativa y la estructura trófica de una comunidad, permanecen relativamente estables, aún cuando algunos individuos mueren o abandonen el área y el tamaño relativo de sus poblaciones cambie. En otras palabras, si usted visita un área hoy y lo hace 20 años más tarde, probablemente le parecerá relativamente igual en sus aspectos básicos. Aún cuando algún tipo de **perturbación** -como fuego, inundación, etc- haya provocado la muerte de varias especies de la comunidad, ésta even-

CUADRO 2.1 Niveles tróficos y su papel en una comunidad

Tipo de organismo	Papel trófico	Nivel trófico	Clasificación fisiológica
Plantas	Productores	Primario	Autotrófico
Herbívoros	Consumidor primario	Secundario	Heterotrófico
Depredadores y parásitos	Consumidores secundarios o mayores	Terciario y más alto	Heterotrófico

al sistema en un momento determinado estimando el peso de la biomasa de la **cosecha en pie**. También podemos medir la tasa de conversión de energía solar a biomasa, este proceso se llama **productividad primaria bruta**, la cual se expresa usualmente en términos de kcal/m²/año. Cuando la energía que usa la planta para su propio mantenimiento se sustrae de la productividad primaria bruta, se obtiene la **productividad primaria neta**.

Los herbívoros (consumidores primarios) se alimentan de la biomasa vegetal y la convierten en biomasa animal, los depredadores y parásitos que se alimentan de los herbívoros u otros consumidores conforman el grupo de consumidores secundarios, terciarios, etc., continuando así el proceso de conversión de biomasa en otros niveles tróficos. Sin embargo, solamente un pequeño porcentaje de la biomasa de un nivel trófico se convierte en biomasa en el siguiente nivel trófico. Esto se debe a que gran cantidad de la energía consumida, hasta el 90%, es utilizada para el funcionamiento del organismo en cada nivel trófico. Adicionalmente, otra importante cantidad de biomasa en cada uno de los niveles no es consumida (y parte de la que es consumida no es digerida totalmente), esta biomasa en forma de materia muerta y/o fecal es consumida eventualmente por los organismos **detritívoros** y **descomponedores**. El proceso de descomposición libera en forma de calor mucha de la energía que fue utilizada en la formación de la biomasa y la restante se incorpora al suelo como materia orgánica.

La energía que abandona al ecosistema natural es principalmente en forma de calor, generado en parte por la respiración de los organismos de los diferentes niveles tróficos y por la actividad de descomposición de la biomasa. La cantidad total de energía que abandona el sistema usualmente es similar a la energía solar capturada en la biomasa de las plantas.

Ciclo de Nutrientos

En adición a la energía, los organismos requieren entradas de materia para mantener sus funciones vitales. Esta materia – en forma de nutrientes que contienen una variedad de elementos y compuestos cruciales – es usada para formar células, tejidos y las complejas moléculas orgánicas que se requieren para el funcionamiento de células y organismos.

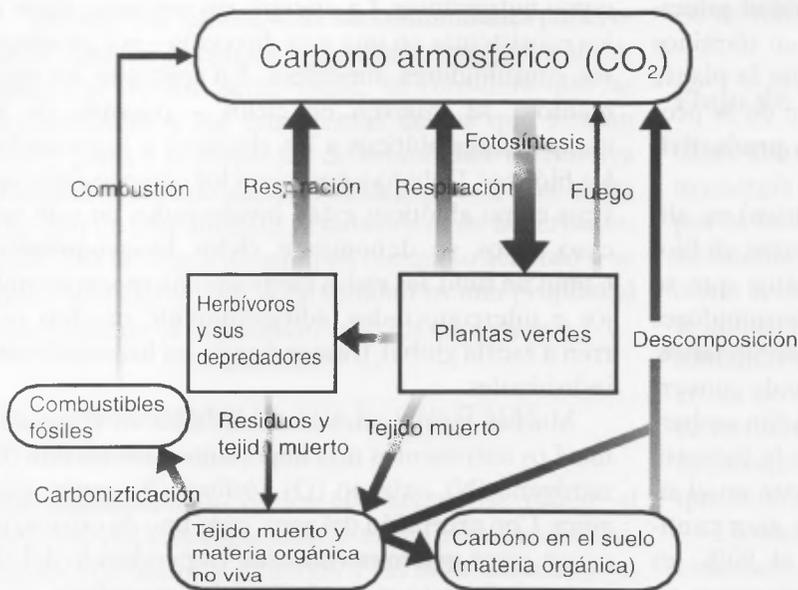
El ciclo de nutrientes en un ecosistema está conectado con el flujo de energía: la biomasa transferida de un nivel trófico a otro contiene tanto energía como nutrientes. La energía, sin embargo, fluye en los ecosistemas en una sola dirección – sol, productores, consumidores, atmósfera. En contraste, los nutrientes se mueven en ciclos – pasando de los componentes bióticos a los abióticos y regresando a los bióticos. Debido a que tanto los componentes bióticos como abióticos están involucrados en este proceso, estos se denominan **ciclos biogeoquímicos**. Como un todo, los ciclos biogeoquímicos son complejos e interconectados, adicionalmente muchos ocurren a escala global, trascendiendo así los ecosistemas individuales.

Muchos nutrientes son reciclados en el ecosistema. Los nutrientes más importantes son: carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O), fósforo (P), azufre (S) y agua. Con excepción del agua, cada uno de estos se conocen como **macronutrientes**. Dependiendo del elemento y la estructura trófica del ecosistema, cada nutriente sigue una ruta específica; sin embargo, se conoce la existencia de dos tipos básicos de ciclos biogeoquímicos. Para el carbono, el oxígeno y el nitrógeno, la atmósfera funciona como un banco de reserva abiótico, de tal modo que podemos visualizar ciclos a nivel global. Una molécula de dióxido de carbono exhalado por un organismo en un lugar cualquiera, puede ser incorporada en la biomasa de una planta localizada en el lado opuesto del planeta.

Otros elementos son menos móviles y se reciclan más localmente dentro de un ecosistema, por ejemplo el fósforo, azufre, potasio, calcio (Ca) y la mayoría de los **micronutrientes**. Esto se debe principalmente a que el suelo es su principal banco de reserva abiótica. Estos nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas, almacenados por cierto tiempo en la biomasa y eventualmente, retornan al suelo por la actividad de los organismos descomponedores.

Algunos nutrientes pueden existir en formas que son fácilmente disponibles para los organismos. El carbono es un ejemplo de lo anterior, ya que se mueve fácilmente de su forma abiótica en la atmósfera, ejemplo CO₂, a la forma biótica, ejemplo carbohidratos en las plantas o animales durante su ciclo. El tiempo de permanencia del carbono en la materia viva, muerta o como humus en el suelo varía mucho, pero para ser reincorporado en forma de biomasa,

FIGURA 2.3
El ciclo del carbono.

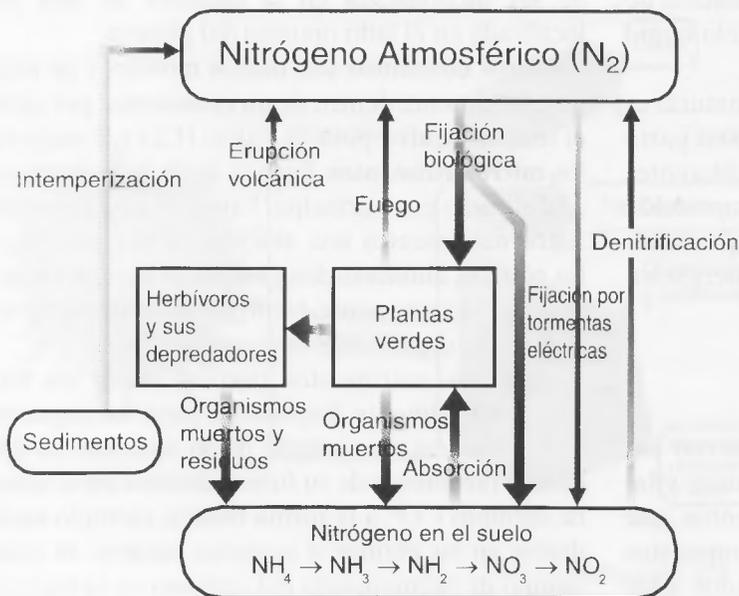


debe retornar a la atmósfera en forma de CO_2 . La Figura 2.3 muestra en forma simplificada el ciclo del carbono enfocado a sistemas terrestres y sin mostrar las reservas de este nutriente en forma de rocas de carbonato.

En la atmósfera, los nutrientes existen en formas poco disponibles para ser utilizados, de modo que deben convertirse en otras formas antes de ser utilizados. Un ejemplo es el nitrógeno atmosférico (N_2). La conversión del N_2 a amonio (NH_3) se logra mediante un proceso de fijación biológica por microorganismos. Así se inicia el proceso que convierte al N_2 en una forma disponible para las plantas. Una vez incorporado en la biomasa vegetal, este nitrógeno fijado puede ser parte de la reserva del suelo y eventualmente, puede ser absorbido por las plantas en forma de nitrato (NO_3). En tanto que este nitrógeno no abandone el sistema en forma de gas como amonio u óxido de nitrógeno, este nutriente puede ser reciclado dentro del ecosistema. La importancia agroecológica de este proceso se discute con más detalle en el Capítulo 16.

Por otro lado, el fósforo no tiene una forma gaseosa significativa. Este se incorpora lentamente al suelo debido a la intemperización de ciertas rocas. Una vez en el suelo, puede ser absorbido por las plantas en forma de fosfatos y formar parte de la biomasa viva, o puede retornar al suelo por la vía de excreciones o descomposición de la biomasa. Este ciclo que involucra a organismos y suelo, tiende a ser muy localizado en un ecosistema, excepto cuando los fosfatos que no son absorbidos tienden a lixiviarse, abandonan el ecosistema, llegan al manto freático

FIGURA 2.4
El ciclo del nitrógeno.



nes crecen y se reducen, el arreglo espacial de los organismos cambia con el tiempo. A pesar de esta dinámica interna, los ecosistemas son prácticamente estables en lo que respecta a su estructura y función general. Esto se debe en parte a la complejidad y a la diversidad de las especies de los ecosistemas.

Uno de los aspectos de la estabilidad de los ecosistemas, tal y como se mencionó anteriormente para las comunidades, es la habilidad de resistir cambios que sean causados por perturbaciones y de recuperarse después de éstas. El proceso de recuperación del ecosistema después de una perturbación, hasta llegar a una forma similar a la original, se llama **sucesión**. Cuando el ecosistema recuperado alcanza nuevamente una etapa muy similar a la original se dice que está en el **clímax**. Si la perturbación no es severa o frecuente, la estructura y función del ecosistema se restablecerá aún cuando la comunidad dominante sea ligeramente diferente.

Los ecosistemas no se desarrollan hasta alcanzar un estado estático. Debido a las perturbaciones naturales, los ecosistemas se mantienen dinámicos y flexibles, hasta cierto punto resistente a factores de perturbación. En general, la estabilidad del ecosistema combinada con los cambios dinámicos se refleja en el concepto de **equilibrio dinámico**. Este concepto tiene especial importancia en el caso de sistemas agrícolas, ya que permite un "balance" ecológico que se basa en el uso sostenible de los recursos y que puede ser "sostenido" a pesar de los cambios (perturbaciones) continuos en la siembra, cultivo, cosecha, etc.

AGROECOSISTEMAS

La manipulación y la alteración que el ser humano hace de los ecosistemas con el propósito de producir alimentos, hace que los agroecosistemas sean muy diferentes a los ecosistemas naturales. Sin embargo, al mismo tiempo es posible observar en los agroecosistemas los procesos, la estructura y otras características de un ecosistema natural.

Comparación de Ecosistemas Naturales con Agroecosistemas

Las Figuras 2.6 y 2.7 muestran diagramas que comparan un ecosistema con un agroecosistema. En ambas figuras el flujo de energía se muestra con líneas continuas y el movimiento de nutrimentos se muestra con líneas discontinuas. La comparación muestra que hay diferencias en algunos aspectos claves.

1. Flujo de Energía

El flujo de energía en un agroecosistema es alterado significativamente por la interferencia humana. Las entradas al sistema provienen principalmente de fuentes manufacturadas por el ser humano, que a menudo no son sostenibles. De este modo, los agroecosistemas se convierten en sistemas abiertos debido a que una cantidad considerable de energía sale en cada cosecha, en lugar de almacenarse en forma de biomasa y quedarse dentro del sistema.

2. Ciclo de Nutrimentos

En la mayoría de los agroecosistemas el reciclaje de nutrimentos es mínimo porque una cantidad considerable abandona el sistema con la cosecha, o debido a la pérdida por lixiviación o por erosión, lo cual sucede en parte por la carencia de biomasa permanente en el sistema. La exposición del

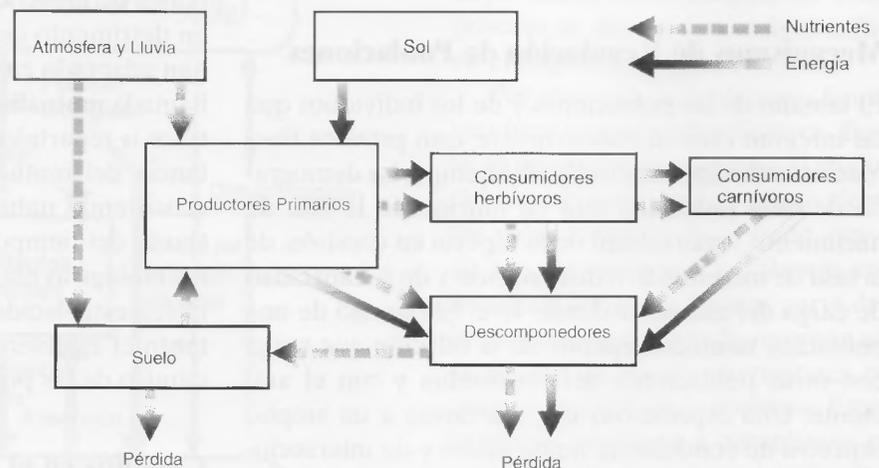


FIGURA 2.6

Componentes funcionales de un ecosistema natural. Los componentes señalados como "atmósfera y lluvia" y "sol" están siempre en el exterior de cualquier sistema específico y se consideran proveedores de entradas esenciales.

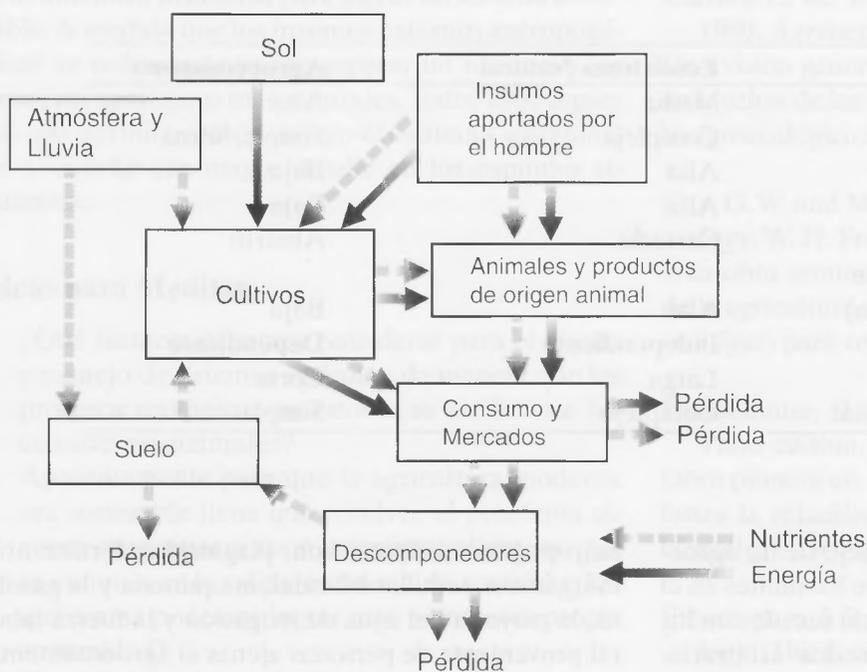


FIGURA 2.7
Componentes funcionales en un agroecosistema. Además de las entradas naturales provenientes de la atmósfera y del sol, un agroecosistema tiene todo un paquete de insumos aportados por el hombre que provienen del exterior del sistema. El agroecosistema también tiene una serie de salidas, en la Figura se les llama "consumo y mercados".

suelo desnudo entre las plantas y entre ciclos de cultivo, también induce la pérdida de nutrientes por lixiviación. Los agricultores actualmente reemplazan los nutrientes perdidos aplicando fertilizantes.

3. Mecanismos de Regulación de Poblaciones

Debido a la simplificación del ambiente y la reducción de los niveles tróficos, las poblaciones de plantas o de animales en los agroecosistemas raramente se autorregulan. Las poblaciones son reguladas por los insumos humanos en forma de semillas o agentes de control de poblaciones, que a menudo dependen de enormes subsidios de energía. La diversidad biológica es reducida, la estructura trófica tiende a ser simplificada y muchos nichos no son ocupados. El peligro del incremento de las poblaciones de plagas a niveles catastróficos está siempre presente a pesar de la intensa interferencia humana para controlarlos.

4. Estabilidad

Debido a su reducida diversidad en estructura y función los agroecosistemas son menos resistentes a las perturbaciones que los ecosistemas naturales. La atención casi exclusiva en la cosecha domina

cualquier "intento" de autoequilibrio, de modo que el sistema solamente puede ser sostenido por la actividad humana en forma de trabajo o de insumos externos.

El Cuadro 2.2 presenta un resumen de las diferencias ecológicas claves entre agroecosistemas y ecosistemas naturales.

A pesar de que existen marcadas diferencias entre agroecosistemas y ecosistemas naturales, ambos sistemas existen como un continuo, uno junto al otro. En una parte de este continuo podemos ubicar a ecosistemas que son totalmente naturales, sin influencia humana directa; por el otro lado, los agroecosistemas varían dependiendo del nivel de influencia humana. Mediante la aplicación de los conceptos ecológicos presentados en este texto, los agroecosistemas pueden ser diseñados de manera similar a los ecosistemas naturales en términos de diversidad de especies, ciclo de nutrientes y heterogeneidad en el hábitat.

El Agroecosistema como Unidad de Análisis

Hasta ahora se ha descrito a los agroecosistemas desde el punto de vista conceptual, falta el aspecto de cómo son básicamente. Es decir, falta aclarar a qué nos

CUADRO 2.2 Diferencias importantes de estructura y función entre agroecosistemas y ecosistemas naturales

	Ecosistema Natural	Agroecosistema
Productividad neta	Media	Alta
Interacciones tróficas	Compleja	Simple, linear
Diversidad de especies	Alta	Baja
Diversidad genética	Alta	Baja
Ciclo de nutrientes	Cerrado	Abierto
Estabilidad (capacidad de recuperación o resiliencia)	Alta	Baja
Control humano	Independiente	Dependiente
Permanencia temporal	Larga	Corta
Heterogeneidad del hábitat	Complejo	Simple

Adaptado de Odum (1969).

referimos cuando discutimos el manejo de un agroecosistema. El primer aspecto es sobre los límites en el espacio. Sobre este aspecto, tal y como sucede con los ecosistemas, los límites son designados arbitrariamente. En la práctica, sin embargo, los límites de un agroecosistema son equivalentes a los de una granja, finca, parcela, milpa, solar, etc., o bien, al de un conjunto de estas unidades.

Otro aspecto a considerar es la relación que existe entre un agroecosistema específico y su entorno social y ambiental. Por su naturaleza, el agroecosistema está inmerso en ambos. Existe toda una red de conexiones a partir de cada agroecosistema hacia la sociedad humana y los ecosistemas naturales. Los consumidores de café en Seattle están conectados con los cafetaleros de Costa Rica, el ecosistema de tundra en Siberia puede afectarse por aspectos que alteran el cultivo convencional de maíz en los Estados Unidos. En términos prácticos, en un agroecosistema debemos distinguir entre qué es lo externo y qué es lo interno. Esto es importante al analizar las entradas al sistema en forma de insumos, porque debemos saber distinguir y conocer cuáles son los elementos internos del sistema. En este texto se asume y usan los límites geográficos (explícitos o implícitos) del agroecosistema como una forma para determinar lo que es interno y lo que es externo. Los insumos que son ingresados al sistema por el hombre se conocen como insumos externos antropogénicos. Aún cuando parece redundante decir insumos y externos, es importante mantener la frase para enfatizar que el origen es ajeno al agroecosistema. Los insumos

antropogénicos típicos son: plaguicidas, fertilizantes inorgánicos, semillas híbridas, maquinaria y la gasolina, la mayoría del agua de irrigación y la fuerza laboral proveniente de personas ajenas al agroecosistema. También hay entradas naturales, las más importantes son: radiación solar, lluvia, viento, sedimentos depositados por inundación y propágulos de plantas.

Agroecosistemas Sostenibles

El principal reto en el diseño de agroecosistemas sostenibles es obtener las características de un ecosistema natural y al mismo tiempo mantener una cosecha deseable. Esta es una forma viable para alcanzar la sostenibilidad del sistema. El flujo de energía puede ser diseñado para depender menos de insumos no renovables, de modo que exista un balance entre la energía que fluye dentro del sistema y la que abandona el sistema en forma de cosecha. El agricultor puede desarrollar y mantener ciclos de nutrientes casi cerrados dentro del sistema, de modo que los nutrientes que salen del sistema en forma de cosecha puedan ser reemplazados en una forma sostenible. Los mecanismos de regulación de poblaciones pueden tener más éxito en un sistema, que como un todo ofrece mayor resistencia a plagas y enfermedades, incrementando el número de hábitats y permitiendo la presencia de enemigos naturales y antagonistas. Finalmente, un agroecosistema que incorpora las cualidades de un ecosistema natural como resistencia a perturbaciones, estabilidad, productividad y balance, proporcionará las condiciones que aseguran el equili-

brio dinámico necesario para lograr un sistema sostenible. A medida que los insumos externos antropogénicos se reducen, se puede esperar un retorno a los procesos ecológicos más naturales. Todos esos aspectos que permiten tener un agroecosistema sostenible se discutirán con mayor detalle en los capítulos siguientes.

Ideas para Meditar

1. ¿Qué factores debemos considerar para el diseño y manejo de sistemas agrícolas, de manera que los procesos ecológicos en éstos sean similares a los ecosistemas naturales?
2. Aparentemente para que la agricultura moderna sea sostenible tiene que resolver el problema de cómo reincorporar los nutrientes al sistema para compensar la salida en forma de cosecha. ¿De qué forma podemos lograr esto en nuestra propia comunidad?
3. El concepto de estabilidad del ecosistema está siendo muy discutido en ecología actualmente. Algunos ecólogos sostienen que ésta no existe debido a que hay perturbaciones y cambios constantes e inevitables. Sin embargo, en agroecología se hace el esfuerzo por lograr la estabilidad en la estructura y función del agroecosistema. ¿Cómo es que el concepto de estabilidad se aplica diferente en ambos contextos, sistema natural y agroecosistema?

Lecturas Recomendadas

Altieri, M. A. 1995. *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. Second edition. Westview Press: Boulder, Co.

Libro pionero sobre los fundamentos de agroecología, con énfasis en estudios de caso y sistemas agrícolas de diferentes partes del planeta.

Brewer, R. 1993. *The Science of Ecology*. Second edition. W. B. Saunders: Philadelphia.

Un libro popular sobre los principios y conceptos de ecología.

Carroll, C. R., J. H. Vandermeer, and P. M. Rosset. 1990. *Agroecology*. McGraw-Hill: New York.

Una visión general que permite al lector introducirse en muchas de las principales corrientes de pensamiento agroecológico en un contexto interdisciplinario.

Cox, G. W. and M. D. Atkins. 1979. *Agricultural Ecology*. W. H. Freeman: San Francisco.

Una obra seminal que enfatiza el impacto ecológico de la agricultura así como la necesidad de un enfoque ecológico para resolver los problemas que causa.

Daubenmire, R. F. 1974. *Plants and Environment*. Third edition. John Wiley and Sons: New York.

Obra pionera en el campo de la autoecología que enfatiza la relación entre la planta y los factores ambientales en los que se desarrolla.

Etherington, J. R. 1995. *Environment and Plant Ecology*. Third edition. John Wiley and Sons: New York.

Una revisión actualizada y profunda en el campo de la ecofisiología, desde la perspectiva de la planta.

Gliessman, S. R. 1990. *Agroecology: Researching the Ecological Bases for Sustainable Agriculture*. Ecological Studies Series # 78. Springer-Verlag: New York.

Presenta diferentes enfoques de las investigaciones sobre las bases ecológicas requeridas para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles.

Golley, F. B. 1993. *A History of the Ecosystem Concept in Ecology*. Yale University Press: New Haven, CT.

Una revisión fundamental sobre el desarrollo del concepto de ecosistema y cómo ha sido aplicado como el centro en ecología.

Lowrance, R., B. R. Stinner, and G. J. House. 1984. *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*. John Wiley and Sons: New York.

Un enfoque conceptual para la aplicación de conceptos ecológicos en el estudio de sistemas agrícolas.

Odum, E. P. 1997. *Ecology: A Bridge Between Science and Society*. Sinauer Associates: Sunderland, MA.

Un texto que presenta los principios de la ecología moderna relacionados con las amenazas a los sistemas que sostienen la vida en la Tierra.

Ricklefs, R. E. 1993. *The Economy of Nature*. Third

edition. W.H. Freeman and Company: New York. Un libro muy completo de ecología para estudiantes interesados en entender cómo funciona la naturaleza.

Smith, R. L. 1990. *Elements of Ecology*. Fourth edition. Harper & Row, Publishers: New York.

Un libro de texto para los estudiantes interesados en biología y estudios ambientales.

SECCIÓN II

LAS PLANTAS Y LOS FACTORES AMBIENTALES

Aún en los ecosistemas más sencillos existen interacciones complejas entre el cultivo y las arvenses, los animales, los microorganismos del suelo, etc. así como las interacciones entre estos organismos y su ambiente físico. Antes de intentar entender todas estas interacciones y relaciones en su nivel más alto de complejidad, es de gran ayuda estudiar los agroecosistemas desde una perspectiva más limitada, es decir la interacción entre una planta de un cultivo cualquiera y su medio. Tal perspectiva se conoce como Autoecología.

El estudio autoecológico de un agroecosistema se inicia conociendo los factores individuales del ambiente y explorando la forma en que cada factor afecta la planta. En concordancia con este enfoque, en

esta sección se presentan capítulos dedicados a un solo factor ambiental importante para el agroecosistema. Cada capítulo describe como cada factor funciona en tiempo y espacio y da ejemplos sobre como los agricultores han aprendido ya sea a adaptar sus cultivos al factor ambiental o a aprovechar cierto factor ambiental para alcanzar la sostenibilidad de su agroecosistema.

Antes de abordar los factores ambientales, se presenta un capítulo que analiza la estructura y función básica de la planta misma. La idea es proveer las bases para entender la respuesta de la planta a su ambiente. La Sección II concluye con un capítulo que explica como integrar los diferentes factores de modo que se puedan ver como partes de un sistema dinámico.

Una planta de maíz emergiendo de los restos orgánicos después de la quema de la vegetación secundaria de descanso, en Tabasco, México. La respuesta de esta planta a las condiciones y a los factores ambientales que enfrentan durante su ciclo de vida será diferente.



LA PLANTA

El diseño y manejo de los agroecosistemas sostenibles ofrecen fundamentos importantes para la comprensión del proceso de crecimiento y desarrollo de las plantas, y de cómo éstas producen la materia vegetal que utilizamos, consumimos, o damos como alimento a nuestros animales. En este capítulo se repasan algunos de los procesos más importantes de la fisiología vegetal, los cuales permiten que la planta viva, transforme la luz solar en energía química, y almacene esa energía en algunas de sus estructuras y en formas útiles para el ser humano. Este capítulo también reseña algunos de los requisitos nutritivos de las plantas. Finalmente, a manera de introducción a los capítulos siguientes de la Sección II, se presentarán algunos de los conceptos y términos utilizados para describir la forma en que las plantas responden y se adaptan individualmente a la diversidad de factores ambientales que posteriormente consideraremos.

NUTRICIÓN VEGETAL

Las plantas son organismos autotróficos (autoabastecedores) por su capacidad de sintetizar carbohidratos usando solamente agua, dióxido de carbono y energía solar. La fotosíntesis, el proceso por el cual la planta captura la luz solar, es el fundamento de la nutrición vegetal. Sin embargo, la elaboración de carbohidratos es tan sólo un componente del desarrollo y crecimiento de la planta. Los nutrimentos esenciales, en combinación con el agua, son necesarios para formar los carbohidratos complejos, los aminoácidos y las proteínas que componen el tejido vegetal, y que desempeñan las funciones claves en los procesos vitales de la planta.

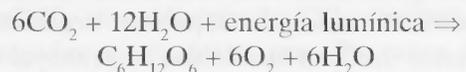
Fotosíntesis

Mediante el proceso de la fotosíntesis, las plantas convierten la energía solar en energía química y la al-

macenan en forma de enlaces químicos en las moléculas de glucosa. Debido a que este proceso de capturar la energía es fundamental para el crecimiento y supervivencia vegetal, y convierte las plantas en organismos útiles para el ser humano, es importante comprender cómo funciona la fotosíntesis.

Las descripciones siguientes del proceso fotosintético son sencillas. Para nuestros propósitos, es más importante comprender las implicaciones agroecológicas de las variantes fotosintéticas que los mecanismos metabólicos precisos. No obstante, si el lector desea una explicación más detallada, se recomienda consultar un texto de fisiología vegetal.

En resumen, la fotosíntesis es la producción de glucosa, a partir de la energía solar, el agua y el dióxido de carbono, y se resume en esta ecuación sencilla:



En realidad, la fotosíntesis se compone de dos procesos distintos, cada uno constituido por varios pasos. Los dos procesos, o etapas, se denominan **reacciones de luz** y **reacciones oscuras**.

Las reacciones de luz transforman la energía lumínica en energía química en forma de ATP y NADPH. Estas reacciones consumen agua y liberan oxígeno. Las reacciones oscuras (que ocurren independientemente de la luz) extraen átomos de carbono del dióxido de carbono de la atmósfera y los utilizan para formar compuestos orgánicos; este es el proceso de **fijación de carbono** y es impulsado por medio del ATP y NADPH resultantes de las reacciones de luz. El producto final de la fotosíntesis, a menudo llamado **fotosintato**, se compone principalmente del azúcar simple denominado glucosa. La glucosa sirve como fuente energética para el crecimiento y el metabolismo tanto de las plantas como de los animales, debido a que fácilmente se puede convertir nuevamente en energía química (ATP) y dióxido de

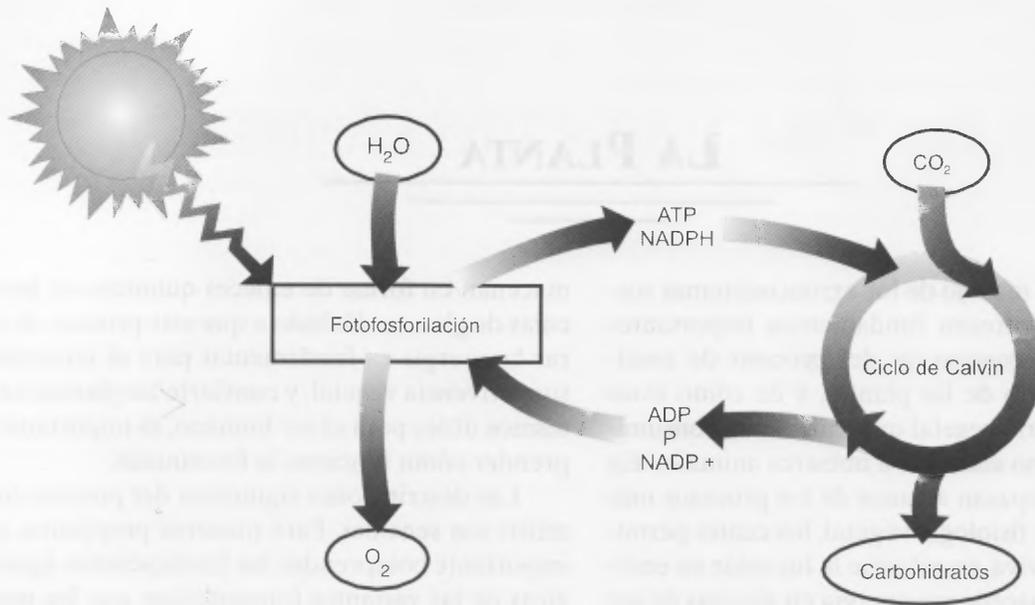


FIGURA 3.1

Procesos básicos de la fotosíntesis. La fotofosforilación es otra denominación para las reacciones de luz; el ciclo de Calvin es la base para las reacciones oscuras.

carbono mediante el proceso de respiración. En las plantas, la glucosa también es la unidad básica para la elaboración de muchos compuestos orgánicos. Tales compuestos incluyen la celulosa, la principal materia de la estructura de la planta y el almidón, una variante de la glucosa almacenada.

Desde el punto de vista agroecológico, es fundamental comprender las maneras por las cuales la tasa fotosintética puede limitarse. Dos factores importantes son la temperatura ambiental y la disponibilidad de agua. Si el calor o la falta de agua llegan a ser excesivos durante el día, los pequeños poros que están distribuidos sobre la superficie de las hojas, llamados **estomas**, por medio de las cuales pasa el dióxido de carbono, comienzan a cerrarse. Como resultado el dióxido de carbono limita la fotosíntesis. Cuando la concentración interna del CO_2 foliar es menor a cierto punto crítico, la planta alcanza el estado conocido como **punto de compensación del CO_2** , lo cual indica que la tasa de la fotosíntesis iguala la tasa de respiración, lo que resulta en un rendimiento energético nulo para la planta. Aún peor, el cierre de los estomas bajo condiciones de carencia hídrica o exceso térmico también elimina al proceso de refrescamiento asociado con la evaporación del agua por medio de la

transpiración, lo cual eleva la concentración interna de O_2 en la hoja. Estas condiciones estimulan la **fotorespiración**, un proceso en el cual se pierde mucha energía y el O_2 sustituye al CO_2 en las reacciones oscuras de la fotosíntesis, resultando en productos inútiles que requieren energía adicional para completar su metabolismo.

Debido a su evolución particular, algunos tipos de plantas han desarrollado formas alternativas para la fijación de carbono que reducen la fotorespiración. Estas formas alternativas de fijación de carbono constituyen diferentes vías fotosintéticas. En conjunto, se conocen tres tipos de fotosíntesis, cada uno confiere ventajas bajo ciertas condiciones y desventajas bajo otras.

La Fotosíntesis C_3

El tipo fotosintético más extendido se conoce como fotosíntesis C_3 . Su nombre se deriva del hecho de que el primer producto estable formado por las reacciones oscuras es un compuesto de tres carbonos. Las plantas que utilizan esta vía fotosintética capturan dióxido de carbono por medio de los estomas durante el día y lo utilizan en las reacciones oscuras para formar glucosa.

Las plantas con este tipo de fotosíntesis presentan mejor desarrollo bajo condiciones frías, dado que la temperatura óptima para la fotosíntesis es relativamente baja (Cuadro 3.1). Sin embargo, debido a que sus estomas deben permanecer abiertos durante el día para obtener el dióxido de carbono, las especies con fotosíntesis C3 están sujetas a que sus tasas fotosintéticas se vean restringidas durante periodos de calor o de sequía. Al cerrarse los estomas para prevenir la pérdida del vapor de agua, también se limita la captura de dióxido de carbono y aumenta la fotorespiración. Algunos cultivos comunes que usan este tipo de fotosíntesis son el frijol, la calabacita y el tomate.

La Fotosíntesis C4

Una variante de la fotosíntesis descubierta recientemente se conoce como fotosíntesis tipo C4. En este sistema, el CO_2 se incorpora en compuestos de cuatro carbonos antes de participar en las reacciones oscuras. Esta fijación inicial de carbono ocurre en ciertas células dotadas de clorofila que se encuentran en el mesófilo de la hoja. El compuesto de cuatro carbonos resultante es trasladado inmediatamente hacia las células de la vaina fascicular, cuyas enzimas separan el carbono adicional y lo expulsan como CO_2 . Esta molécula de CO_2 luego se utiliza para formar los compuestos de tres carbonos que participan en las reacciones oscuras de la misma manera que ocurre en la fotosíntesis C3.

La vía C4 permite fijar el dióxido de carbono cuando las concentraciones de esta última sustancia son menores a las usadas para la fotosíntesis. Esto permite que ocurra la fotosíntesis aún cuando los estomas estén cerrados, permitiendo que el CO_2 liberado por la respiración interna de la planta reemplace al CO_2 que normalmente proviene de la atmósfera. La vía C4 también evita la fotorespiración porque dificulta la competencia del O_2 con el CO_2 en las reacciones oscuras. Como resultado, la fotosíntesis C4 puede ocurrir bajo condiciones de escasez de agua y temperatura elevada, cuando la fotosíntesis de plantas C3 es limitada. Al mismo tiempo, la temperatura óptima para la fotosíntesis regularmente es más alta en las plantas con fotosíntesis C4.

Por lo tanto, las plantas tipo C4 utilizan menos agua durante períodos de alto potencial fotosintético

y, en comparación con las plantas tipo C3, presentan mayores tasas de fotosíntesis neta y de acumulación de biomasa durante condiciones calurosas y secas. La fotosíntesis tipo C4 implica un paso bioquímico adicional, pero bajo condiciones de sol intenso y directo, altas temperaturas y limitada disponibilidad de agua, esta vía confiere una clara ventaja. Algunos cultivos muy conocidos con fotosíntesis C4 son el maíz, el sorgo y la caña de azúcar; otro cultivo menos conocido es el amaranto. Las plantas C4 son típicas de las regiones tropicales, especialmente de las zonas secas. Las plantas originarias de zonas desérticas, o de pastizales de zonas templadas y climas tropicales tienden a presentar este tipo de fotosíntesis.

La Fotosíntesis MAC

Un tercer tipo de fotosíntesis se conoce como fotosíntesis del metabolismo del ácido crasuláceo (MAC). Este es parecido a la fotosíntesis C4. Durante las noches, cuando los estomas pueden permanecer abiertos sin riesgo de pérdida excesiva de agua, el dióxido de carbono es tomado para formar el malato, un compuesto de cuatro carbonos que luego se almacena en las vacuolas. El malato almacenado sirve durante el día como fuente de CO_2 , abasteciendo de carbono a las reacciones oscuras. Por tanto, las plantas con fotosíntesis tipo MAC pueden mantener sus estomas cerrados durante el día, porque el CO_2 que requieren lo obtienen durante la noche. Como es de esperarse, las plantas tipo MAC son comunes en los ambientes calientes y secos, tales como los desiertos, e incluyen muchas especies suculentas y a las cactáceas. Las bromeliáceas que viven como epífitas (plantas que no tienen sus raíces en el suelo, si no que las anclan sobre otras plantas) también son tipo MAC; su hábitat es el dosel de los bosques lluviosos, el cual es más seco que los otros nichos formados por el resto de la comunidad de plantas que integran el bosque tropical. Un cultivo importante que emplea la fotosíntesis tipo MAC es la piña, una bromeliácea.

Comparación de las Vías Fotosintéticas

Una comparación de las diferentes vías fotosintéticas se presenta en el Cuadro 3.1. Los diferentes arreglos de los cloroplastos dentro de las hojas de cada tipo de planta se correlacionan con distintas respuestas a la

CUADRO 3.1 Comparación de las tres vías fotosintéticas

	C3	C4	MAC
Punto de saturación lumínica (pies-candelas)	3000 – 6000	8000 – 10000	?
Temperatura óptima(°C)	15 – 30	30 – 45	30 – 35
Punto de compensación del CO ₂ (mg/kg de CO ₂)	30 – 70	0 – 10	0 – 4
Tasa fotosintética máxima (mg CO ₂ /dm ² /h)	15 – 35	30 – 45	3 – 13
Tasa de crecimiento máxima (g/dm ² /día)	1	4	0.02
Fotorespiración	alta	baja	baja
Comportamiento de los estomas	Abiertos durante el día, cerrados en la noche	Abiertos o cerrados durante el día, cerrados en la noche	Cerrados durante el día, abiertos durante la noche

Fuente: Larcher (1980); Loomis & Conner (1992); Etherington (1995).

CUADRO 3.2 Comparación de las tasas de fotosíntesis entre plantas C3 y C4 neta

Tipo de Cultivo	Tasa fotosintética neta (mg CO ₂ /dm ² área foliar/hora)*
C3	
Espinaca	16
Tabaco	16 – 21
Trigo	17 – 31
Arroz	12 – 30
Frijol	12 – 17
C4	
Maíz	46 – 63
Caña de azúcar	42 – 49
Sorgo	55
Pasto bermuda	35 – 43
Amaranto	58

*Medidas con intensidad lumínica alta y alta temperatura (20 – 30 °C)

Fuente: Zelitch (1971) y Larcher (1980).

luz, a la temperatura y al agua. Las plantas de tipo C3 tienden a presentar sus máximas tasas fotosintéticas bajo condiciones moderadas de iluminación y de temperatura, a tal grado que el proceso se inhibe ba-

jo condiciones excesivas de iluminación y de calor. Las plantas tipo C4 se adaptan mejor a la alta iluminación y al calor y junto a su capacidad de cerrar los estomas durante el día en respuesta a la alta temperatura y a la falta de agua, estas plantas utilizan el agua de manera más eficiente bajo tales condiciones. Las plantas tipo MAC pueden resistir las condiciones más calurosas y secas, cerrando sus estomas durante el día, pero a cambio de esto sacrifican su crecimiento y la tasa fotosintética como mecanismo para sobrevivir bajo condiciones extremas.

No obstante, la mayor eficacia fotosintética de las plantas tipo C4, son las plantas C3, tales como el arroz y el trigo, las que contribuyen con la mayoría de la producción alimentaria mundial. La superioridad de la fotosíntesis C4 solo se da cuando la capacidad de un cultivo para transformar la luz en biomasa constituye el único factor limitante, lo cual rara vez ocurre en condiciones de campo.

Repartición de Carbono

Los compuestos de carbono producidos por la fotosíntesis juegan un papel clave en el crecimiento y la respiración de las plantas, debido a su doble función tanto como fuente energética, como por su estructu-

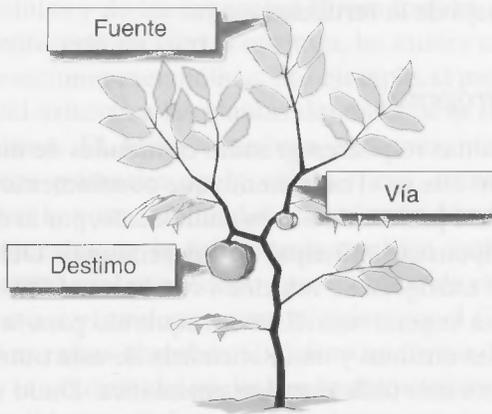


FIGURA 3.2
Repartición del carbono.

ra de carbono para la construcción de otros compuestos orgánicos. La manera en que la planta distribuye los compuestos de carbono derivados de la fotosíntesis, y los designa para los diferentes procesos fisiológicos y componentes vegetales, es descrita mediante el término **repartición de carbono**. Debido a que producimos cultivos precisamente por su capacidad para elaborar biomasa cosechable, la repartición de carbono es de interés para los agricultores.

Aunque la fotosíntesis presenta una eficiencia de alrededor del 20% en la captura de energía, la conversión del fotosintato a biomasa rara vez excede el 2% de eficiencia. Esta eficiencia es baja principalmente porque la respiración interna (la oxidación del fotosintato para el mantenimiento celular) consume gran parte del fotosintato y porque la fotorespiración limita el rendimiento fotosintético, precisamente cuando su potencial es mayor. Mucha de la investigación dirigida al mejoramiento de la producción agrícola se ha enfocado al aumento de la eficacia de la fijación de carbono por medio de la fotosíntesis, pero estos esfuerzos no han tenido éxito. La clave para el aumento del rendimiento de nuestros cultivos mediante el mejoramiento, tanto tradicional como moderno, ha sido el aumento de la biomasa cosechable en relación con la biomasa total.

Dado que la capacidad de las plantas para generar biomasa es limitada, su modo de repartir el carbono capturado tiene gran importancia para la

agricultura. El hombre selecciona las plantas que destinan la mayor proporción de fotosintato hacia las partes que se cosechan, y tal repartición ocurre a expensas de otras partes de la planta.

Por lo general, la parte cosechada de la mayoría de los cultivos tiene en sí una capacidad fotosintética limitada y, por lo tanto, el rendimiento depende en gran medida de la cantidad de carbohidratos trasladados por el floema desde las partes fotosintéticamente activas hacia las partes cosechables.

En términos ecológicos, a menudo se considera que el repartimiento de carbono es un fenómeno que involucra una fuente, una vía y un destino. Por lo general, la fuente es la hoja, específicamente los cloroplastos. Se ha realizado investigación detallada sobre la fisiología y bioquímica asociadas con la transferencia del carbono desde el cloroplasto y dentro de las estructuras para su transporte. En este proceso es activado un complejo de localizadores y de enzimas. Una vez en el floema, el carbono se moviliza por el tallo hacia los granos, las inflorescencias, frutos, los tubérculos u otras partes a las que son destinados. Al llegar a este punto, ocurre una "descarga" del floema y una "carga" del destino. La transferencia desde los elementos vasculares al tejido del destino depende casi siempre del grado de desnivel de la concentración de azúcares entre ambas partes.

Los productos de la fotosíntesis son compuestos de carbono, oxígeno e hidrógeno, que a su vez constituyen en promedio el 90% de la materia vegetal seca. Por lo tanto, existe una relación estrecha entre la fotosíntesis total y la productividad de toda la planta. La tasa fotosintética total está relacionada a las tasas por unidad foliar, así como a la tasa de producción de nueva área foliar, pero también depende de la tasa de transferencia desde las fuentes fotosintéticas hacia los destinos del fotosintato. Mientras se estén formando hojas nuevas, el carbono permanecerá dentro de la zona de desarrollo foliar; únicamente después de haberse formado todas las hojas, este se transfiere a otros destinos. Al completarse el dosel foliar, la fotosíntesis del cultivo y su crecimiento dependerán principalmente de la tasa de fijación neta de CO_2 por unidad foliar.

Durante el crecimiento, varias estructuras de la planta compiten entre sí para obtener parte del carbono fijado por las hojas, y como resultado algunas partes acumulan más biomasa que otras. Aún no se

conocen bien los mecanismos que regulan la repartición de fotosintato dentro de la planta, aunque es claro que el proceso es dinámico y está relacionado tanto a las condiciones ambientales como a los patrones de desarrollo genético específicos de cada planta. Algunos investigadores buscan la manera de modificar la repartición de carbono en los cultivos; un ejemplo es el desarrollo de los cultivos perennes, en los cuales el reto es lograr un equilibrio de la repartición del carbono entre la estructura vegetal de la planta (especialmente tallos y raíces) y los granos.

Requerimientos Nutritivos

La fotosíntesis provee a la planta gran parte de sus requisitos nutritivos—su energía, carbono y el oxígeno para la construcción de los compuestos estructurales y funcionales importantes. En combinación con el hidrógeno—que se deriva del agua que absorben las raíces mediante la transpiración—el carbono y el oxígeno constituyen aproximadamente el 95% del peso fresco de una planta promedio.

Los elementos que conforman el otro 5% de la materia vegetal deben ser obtenidos de otra parte—principalmente del suelo. Estos elementos constituyen los nutrientes esenciales para la planta. Estos son necesarios para formar las estructuras de la planta, los ácidos nucleicos que coordinan varios procesos de la planta, y las enzimas y catalizadores que regulan el metabolismo vegetal. Ellos también ayudan a mantener el equilibrio osmótico interno y participan en la absorción de los iones provenientes de la solución del suelo. Si algún nutriente no está disponible en la cantidad adecuada, la planta sufre y no se desarrolla adecuadamente. En la agricultura hemos aprendido a ajustar la dosis de estos nutrientes en el suelo para satisfacer las necesidades de los cultivos.

Los tres nutrientes que se necesitan en cantidades relativamente abundantes, y que juegan un papel importante como fertilizantes inorgánicos dentro de la agricultura, son el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Estos son clasificados como macronutrientes. Las plantas difieren en la cantidad requerida de estos nutrientes. Como cada variedad se ha adaptado a diferentes hábitats, cada uno con condiciones ambientales propias, es lógico que exista mucha variación en cuanto a requerimientos nutritivos. Una

revisión de la variación de las propiedades nutritivas nos puede indicar la selección apropiada de cultivos y el manejo de la fertilidad.

El Nitrógeno

Las plantas requieren grandes cantidades de nitrógeno, pero este es el nutriente que comúnmente es escaso. Está presente en cada aminoácido, por lo cual es el componente principal de las proteínas. Debido a esto, el nitrógeno se relaciona con hasta el 50% de la biomasa vegetal seca. Este es requerido para la síntesis de las enzimas y una deficiencia de este nutriente afecta casi toda reacción enzimática. Dado que el nitrógeno forma parte de la clorofila y es requerido para su síntesis, por tanto no es sorprendente que las plantas con deficiencia de este nutriente manifiesten el amarillamiento que indica que el suelo carece de la cantidad necesaria de nitrógeno. Es necesario también cantidades adecuadas de nitrógeno para que todas las plantas puedan florecer y fructificar normalmente. Típicamente las plantas contienen entre 1 y 2% de nitrógeno en proporción a su peso seco, pero no es raro que este contenido exceda el 5%.

La mayoría de las plantas obtienen el nitrógeno mediante intercambio iónico con la solución del suelo en forma de NO_3^- , o NH_4^+ enlazado al humus o a los minerales arcillosos. Una excepción importante es el caso del nitrógeno capturado directamente de la atmósfera por microorganismos simbióticos que viven en las raíces de la mayoría de las Fabáceas y de algunas otras familias vegetales y que lo pasan a la planta hospedante en una forma que puede ser aprovechado por éstas. Por lo general las formas de nitrógeno disponibles en el suelo existen en niveles muy bajos debido a su rápida absorción, además de la potencial pérdida por lixiviación debido a la filtración de agua de lluvia o de riego.

El Fósforo

El fósforo es un componente importante de los ácidos nucleicos, las proteínas nucleares, la fitina, los fosfolípidos, el ATP y otros tipos de compuestos fosforilados, incluso ciertos sacáridos. El fósforo es parte íntegra del ADN de los cromosomas y del ARN del núcleo y de los ribosomas. Las membranas celulares

res dependen de los fosfolípidos para regular el movimiento de los materiales que deben entrar y salir de las células y de las organelas. Como fosfato, este nutriente está en ciertas enzimas, las cuales catalizan las reacciones metabólicas. Por ejemplo, el metabolismo del azúcar en las plantas depende de la fosfoglucomutasa. El fósforo también está presente en las paredes primarias de la célula como enzimas que afectan la permeabilidad de las mismas. Las reacciones iniciales de la fotosíntesis también incluyen al fósforo; el cual se encuentra en el azúcar de cinco carbonos con el cual reacciona inicialmente el CO_2 .

Las raíces absorben al fósforo en forma de fosfato de la solución del suelo. Los fosfatos solubles están disponibles y por lo tanto las plantas pueden absorberlos fácilmente. En la mayoría de los suelos el fósforo disponible es bastante bajo a excepción de los suelos derivados de materiales con alto contenido fosfórico, o en los suelos donde la fertilización durante mucho tiempo ha aumentado el contenido de fósforo. Las plantas absorben grandes cantidades de este nutriente cuando está disponible, acumulando hasta el 0,25% de su peso total seco, pero cuando hay deficiencia rápidamente muestran síntomas de falta de este nutriente. Las hojas se tornan azulosas o permanecen de color verde oscuro, y sobresalen pigmentos morados (antocianinas) en la superficie inferior, a lo largo de las venas o cerca de la punta de las hojas. Cuando hay carencia de fósforo se afecta seriamente el desarrollo de la raíz y de los frutos.

El Potasio

El potasio no es un componente estructural de la planta, ni tampoco de las enzimas y proteínas. Su función parece ser principalmente reguladora: por ejemplo, participa en la osmoregulación (movimiento estomatal) y como cofactor en varios sistemas enzimáticos. Se conoce bien donde se encuentra el potasio dentro de la planta, pero no la función que desempeña. El potasio afecta a la mayoría de los procesos metabólicos que se han estudiado. Por ejemplo, en el metabolismo de las proteínas parece que activa ciertas enzimas responsables del enlace entre los péptidos y de la incorporación de los aminoácidos a las proteínas. El potasio es requerido para la formación del almidón y los azúcares, para su distribución a to-

da la planta. Se ha comprobado que este nutriente es necesario para la división y el crecimiento celular y que de alguna forma, está vinculado a la permeabilidad y a la hidratación. Las plantas son más resistentes a las plagas y al estrés ambiental cuando satisfacen sus requerimientos de potasio.

Las plantas obtienen el potasio en forma del catión K^+ , el cual es absorbido por las raíces de los sitios de absorción en la matriz del suelo o en forma disuelta, como ion intercambiable, de la solución del suelo. Cuando las plantas tienen deficiencia de este nutriente muestran principalmente un desorden en el balance hídrico; las hojas presentan puntas secas o con los márgenes doblados, y en algunas ocasiones mayor susceptibilidad a las pudriciones de la raíz. Regularmente el potasio abunda en los suelos y bajo condiciones óptimas, los tejidos vegetales contienen entre 1 y 2% de este nutriente en relación con su peso seco total, pero por extracción excesiva provocada por las cosechas o la lixiviación del suelo se pueden presentar deficiencias de este nutriente.

Otros Macronutrientos

También se considera a otros tres nutrientes—el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el azufre (S)—como macronutrientos, pero esta clasificación responde más a los niveles relativamente altos en que se acumulan en los tejidos vegetales y no a su importancia en las estructuras y procesos. Esto no significa que su papel no sea valioso, porque cuando cualquiera de estos nutrientes es escaso en el suelo, el desarrollo de la planta es afectado y rápidamente aparecen los síntomas propios de la deficiencia. El calcio y el magnesio pueden ser absorbidos fácilmente por las raíces, por el intercambio de cationes (en forma de Ca^{2+} y Mg^{2+}), pero el azufre es absorbido como anión (SO_4^{2-}), en menor cantidad, de sitios en el suelo ligados orgánicamente, o cuando se disocian los sulfatos de Ca, Mg, o de Na.

Micronutrientos

El hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), boro (B) y cloro (Cl) son llamados micronutrientos o elementos escasos. Cada uno tiene un papel vital en las plantas, pero en canti-

CUADRO 3.3 Los micronutrientes y los procesos en los que ellos están involucrados

Nutriente	Proceso
Boro(B)	Transporte de carbohidratos y su metabolismo, metabolismo fenólico, activación de reguladores de crecimiento
Cloro(Cl)	Hidratación celular, activación de enzimas en la fotosíntesis
Cobre(Cu)	Metabolismo basal, metabolismo del nitrógeno, metabolismo secundario
Hierro (Fe)	Síntesis de la clorofila, enzimas del transporte de electrones
Manganeso (Mn)	Metabolismo basal, estabilización de la estructura del cloroplasto, metabolismo del nitrógeno
Molibdeno (Mo)	Fijación de nitrógeno, metabolismo del fósforo, absorción y traslado del hierro
Zinc (Zn)	Formación de la clorofila, activación enzimática, metabolismo basal, degradación de proteínas, biosíntesis hormonal

Adaptado de Treshow (1970).

dades extremadamente pequeñas. De hecho, la mayoría de estos elementos son tóxicos para las plantas cuando las concentraciones en el suelo son elevadas. Todos son absorbidos de la solución del suelo por un intercambio iónico en la superficie radicular.

El papel de cada micronutriente en los procesos biológicos de la planta se presenta en el Cuadro 3.3. Como es lógico, cualquiera de esos procesos fisiológicos se inhibe o altera por la carencia del micronutriente respectivo. Muchos fertilizantes inorgánicos contienen pequeñas cantidades de estos elementos como contaminantes, y varias mezclas de estos elementos son comúnmente agregados a los suelos que han sido manejados en forma convencional durante mucho tiempo. Los fertilizantes orgánicos, especialmente aquellos elaborados a partir de materia vegetal descompuesta y el estiércol, son ricos en micronutrientes.

La Transpiración

Todos los procesos vitales de la planta, incluyendo la fotosíntesis, la distribución de carbono y el metabolismo, dependen de que exista un flujo continuo de agua desde el suelo hasta la atmósfera por medio de una vía que se extiende desde el suelo, por la raíz, el tallo, hacia el follaje y finalmente hasta la atmósfera, a través de los estomas. A este flujo se le llama **transpiración**.

La pérdida de agua que sufren las hojas crea un desbalance de la concentración, o un bajo potencial de agua foliar, lo cual ocasiona que mediante la capilaridad se mueva más agua en la planta hasta las hojas para reponer la pérdida. La cantidad de agua enlazada químicamente en los tejidos vegetales, o que forma parte de los procesos tales como la fotosíntesis, es muy pequeña en relación con la cantidad eliminada diariamente debido a la transpiración. El movimiento de agua dentro de la planta es muy importante para el ciclo de los nutrimentos y en suelos secos, como se verá en los capítulos siguientes.

LA PLANTA Y SU INTERACCIÓN CON EL AMBIENTE

Cada uno de los procesos fisiológicos descritos anteriormente permite a la planta responder y sobrevivir en su ambiente. Para el diseño y manejo de los sistemas agrícolas sostenibles es imprescindible que comprendamos cómo afectan los factores ambientales a las plantas y su fisiología.

El estudio ecológico de las respuestas de cada planta a los diversos factores ambientales—conocido como autoecología o ecología fisiológica en el sentido puro, y ecología de cultivos en su sentido aplicado, es por lo tanto, fundamental para el entendimiento agroecológico. En la segunda sección se repasarán algunas de las bases conceptuales de la autoecología. Con el propósito de ampliar la visión a nivel del agroecosistema, cada factor ambiental y su efecto en las plantas cultivadas se presentarán en un capítulo aparte.

Ubicación de la Planta en su Medio Ambiente

Cada especie ocupa un lugar particular en su ecosistema, el cual se conoce como **hábitat**. Este se caracte-

riza por un conjunto específico de condiciones ambientales que incluyen la interacción de cada especie con las otras especies que pertenecen a ese hábitat. Dentro de su hábitat, cada especie desempeña un papel ecológico o una función particular, lo cual se conoce como **nicho ecológico** de la especie. Por ejemplo, la secoya (*Sequoia sempervirens*) tiene un hábitat específico en la costa norte de California, que se distingue por un clima marítimo moderado y la presencia de una neblina de verano que compensa la falta de lluvia durante esa estación. A la vez, los árboles de secoya ocupan un nicho ecológico de productores autotróficos capaces de modificar el microclima debajo de sus doseles emergentes y de ser las especies dominantes de su comunidad.

Respuestas a los Factores Ambientales

Durante su ciclo de vida cada planta pasa por varios estados de desarrollo, los cuales incluyen la germinación de la semilla, su establecimiento inicial, el crecimiento, la floración y la dispersión de la semilla. Cada uno de estos estados implica algún cambio de tipo fisiológico, o **respuesta**, por parte de la planta. La mayoría de las respuestas de las plantas están directamente relacionadas con las condiciones ambientales.

Respuestas de Desencadenamiento

Muchas respuestas de las plantas se desencadenan en respuesta a algún estímulo externo. Si bien es cierto que tales respuestas se desencadenan al darse cierta condición, esa condición externa no es necesaria para que la respuesta siga presentándose. Por ejemplo, la semilla del tabaco requiere iluminación antes de germinar, pero la iluminación puede durar tan sólo una fracción de segundo. Después de esa breve iluminación, la semilla germinará aún cuando se siembre en total oscuridad.

Respuestas Dependientes

Algunas respuestas de las plantas dependen de la presencia continua de alguna condición externa particular. La respuesta es tanto inducida como mantenida por el estímulo externo. La producción de hojas sobre los tallos espinosos del ocotillo (*Fouquieria splendens*) en el desierto de Sonora es un ejemplo de este tipo de respuesta. Tan sólo un día o dos después de una lluvia significativa, aparecen las hojas sobre los tallos; y mientras la humedad del suelo sea suficiente, la planta mantiene sus hojas, pero cuando se alcanza el punto de marchites, las hojas se desprenden.

Respuestas Independientes

Finalmente, ciertas respuestas de las plantas ocurren sin ser provocadas por condiciones ambientales, y son producto de un conjunto de factores internos, los cuales están determinados y regulados fisiológicamente. Por ejemplo, una planta de maíz florecerá al lograr cierto estado de crecimiento y desarrollo. Por su efecto sobre el crecimiento, las condiciones externas podrían obligar a que la floración se anticipe o retrase, pero la transición fenológica particular de la planta es controlada internamente.

Límites y Tolerancias

La capacidad que manifiesta cada especie para ocupar su hábitat particular es producto de un conjunto de adaptaciones resultado de la evolución de esa es-

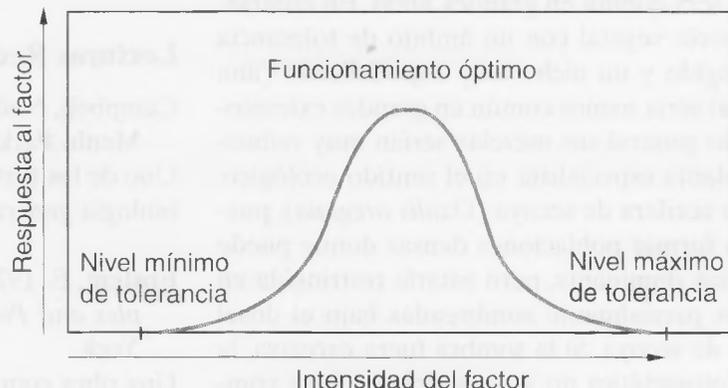


FIGURA 3.3

Rango de tolerancia de una planta a un factor ambiental.

pecie a través del tiempo. Estas adaptaciones permiten que la planta funcione con ciertos niveles de humedad, temperatura, luz, viento y otras condiciones. Para cada uno de los factores, existe un nivel máximo y mínimo de tolerancia fuera de los cuales la especie no puede sobrevivir. Entre estos extremos existe un punto óptimo en el cual la especie se desempeña mejor. Por ejemplo, para el banano, una planta tropical, el promedio de temperatura óptimo mensual es de 27° C; a más de 50° C las plantas de banano comienzan a mostrar hojas o partes de estas secas y dejan de crecer; por debajo de 21° C el crecimiento disminuye debido a la reducción de hojas nuevas y al retraso de sus brotes.

Finalmente, la gama de los límites de tolerancia y el punto óptimo de cada especie con respecto a factores ambientales es producto de la manera en que ellos afectan los procesos fisiológicos de la planta. Por ejemplo, la tolerancia que pueda tener un tipo de planta hacia un ámbito de temperaturas, depende de la manera en que la temperatura afecta la fotosíntesis, la transpiración y los demás procesos fisiológicos de la planta. Cuando todos los factores bióticos y abióticos del ambiente se integran a la ecuación de tolerancia, se manifiesta el ámbito completo de la adaptabilidad de cada especie. De esta manera se integran completamente el hábitat y el nicho de cada planta.

Una especie vegetal con un ámbito de tolerancias amplio a las condiciones de su entorno (conocida como una **generalista**) y una buena capacidad para interactuar con otras especies (especie con un nicho amplio o con una considerable capacidad de traslape de nichos) será común en grandes áreas. En contraste, una especie vegetal con un ámbito de tolerancia más restringido y un nicho muy especializado (una **especialista**) sería menos común en grandes extensiones y por lo general sus mezclas serían muy reducidas. Una planta especialista en el sentido ecológico, tal como la acedera de secoya (*Oxalis oregana*), puede llegar a formar poblaciones densas donde puede ser la especie dominante, pero estaría restringida en condiciones parcialmente sombreadas bajo el dosel de árboles de secoya. Si la sombra fuera excesiva, la actividad fotosintética no sería suficiente para compensar los requerimientos de respiración de la planta y si el sol fuera demasiado intenso, esta especie sería

incapaz de resistir la desecación provocada por la radiación solar directa. Por lo tanto, el nivel óptimo de luz de la acedera es un punto intermedio entre estos dos extremos.

En síntesis, cada planta tiene un hábitat específico como resultado del desarrollo en el tiempo de un conjunto de respuestas de adaptación al ambiente en el cual vive. Los límites de tolerancia de cada especie vegetal restringen a los miembros de esa especie a un hábitat particular, dentro del cual se dan interacciones con otras especies. Esto se da tanto en los agroecosistemas como en los ecosistemas naturales. El funcionamiento de cada planta dentro de un agroecosistema dependerá del efecto de cada factor ambiental. En los capítulos siguientes, investigaremos en detalle cada uno de estos factores.

Ideas para Meditar

1. ¿Cómo pudieron haber surgido las variantes de la fotosíntesis? ¿Cuáles condiciones ambientales específicas seleccionarían a cada tipo fotosintético y cómo podríamos emplear ese conocimiento en la agricultura?
2. ¿Cuál es tu concepto de una "nutrición vegetal balanceada" y cómo intentarías mantenerla bajo el contexto de un agroecosistema?
3. ¿Por qué la planta distribuye el carbono entre varias partes de su estructura?
4. ¿Cuántos factores deben incluirse para poder comprender totalmente al ámbito completo de condiciones que definen el hábitat de una planta?

Lecturas Recomendadas

Campbell, Neil. 1987. *Biology*. Benjamin Cummings: Menlo Park.

Uno de los textos más completos y prestigiosos sobre biología general.

Epstein, E. 1972. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. John Wiley and Sons: New York.

Una obra completa en el importante tema de la nutrición vegetal.

Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. Third Edition. Springer: Berlin.

Un texto muy conocido sobre la función de la planta en interacción con el ambiente.

Loomis, R. S. and D. J. Connor. 1992. *Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems*. Cambridge University Press: Cambridge.

Un texto que presenta la ecología fisiológica y alternativas para lograr que los cultivos logren satisfacer sus requerimientos.

Taiz, L. and E. Zeiger. 1991. *Plant Physiology*. Benjamin Cummings: Menlo Park.

Una reseña completa de fisiología vegetal; combina aspectos químicos y moleculares con sus aplicaciones ecológicas a un nivel más amplio.

Treshow, M. 1970. *Environment and Plant Response*. McGraw-Hill: New York.

Presenta la ecología fisiológica desde el punto de vista de la respuesta de las plantas a las limitaciones impuestas por el ambiente.

RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar que llega a la tierra llega en forma de ondas electromagnéticas que varían en longitud desde aproximadamente 100 micrómetros de radio hasta 1000 micrómetros. Esta radiación forma el espectro electromagnético. Las ondas del espectro electromagnético entre 1 micrómetro y 1000 micrómetros son las ondas de radio en onda larga y corta. La radiación electromagnética de entre 1 micrómetro y 100 micrómetros son las ultravioletas. La luz visible es el componente más importante del espectro electromagnético que llega a la tierra. La luz visible tiene una longitud de onda entre 0.4 micrómetros y 0.7 micrómetros. La luz roja tiene una longitud de onda entre 0.6 micrómetros y 0.7 micrómetros, la luz amarilla entre 0.5 micrómetros y 0.6 micrómetros, la luz verde entre 0.5 micrómetros y 0.6 micrómetros, la luz azul entre 0.4 micrómetros y 0.5 micrómetros, la luz violeta entre 0.4 micrómetros y 0.5 micrómetros. La luz roja y la luz amarilla son las ondas de mayor longitud de onda y por lo tanto tienen la menor energía. La luz violeta y la luz azul son las ondas de menor longitud de onda y por lo tanto tienen la mayor energía.



Figura 4.1 El espectro electromagnético. El espectro de ondas de radio tiene la mayor longitud de onda y por lo tanto la menor energía. La luz visible tiene una longitud de onda entre 0.4 micrómetros y 0.7 micrómetros. La luz roja tiene la mayor longitud de onda y por lo tanto la menor energía. La luz violeta y la luz azul tienen la menor longitud de onda y por lo tanto la mayor energía.

LUZ

La luz solar es la principal fuente de energía para los ecosistemas. Esta es capturada por las plantas mediante la fotosíntesis y la energía es almacenada en los enlaces químicos de los compuestos orgánicos. La luz solar también controla el estado del tiempo en la Tierra: la energía luminosa transformada en calor afecta los patrones de lluvia, la temperatura de la superficie, el viento y la humedad. La forma en que esos factores ambientales se distribuyen en la superficie del globo terráqueo determina el clima y tiene importancia para la agricultura. Todos estos factores relacionados con la luz serán descritos detalladamente en los capítulos siguientes.

Este Capítulo se enfoca a la luz natural y cómo afecta directamente a los agroecosistemas. La luz natural comprende la región del espectro electromagnético que va desde el espectro ultravioleta invisible pasando por el espectro de la luz visible hasta el infrarrojo invisible. En este capítulo también se analiza cómo la luz natural puede ser manejada para transportarla en forma más eficiente a través del sistema, y cómo puede ser usada para mantener las múltiples

y distintas funciones del sistema y finalmente convertir parte de éste en cosechas sostenibles.

RADIACIÓN SOLAR

La energía solar que recibe la tierra llega en forma de ondas electromagnéticas que varían en longitud desde nanómetros (nm) menores de 0,001 a más de 1 000 000 000 nm. Esta energía forma lo que se llama espectro electromagnético. La parte del espectro electromagnético entre 1 nm y 1 000 000 nm es considerada como luz; sin embargo, no toda es visible. La luz con longitudes de onda entre 1nm a 390 nm es conocida como luz ultravioleta. La luz visible es el componente siguiente con longitudes de onda entre 400 nm y 760 nm. La luz con una longitud de onda mayor a 760 nm y menor a 1 000 nm, es conocida como infrarroja, y tal como la luz ultravioleta, es invisible al ojo humano; cuando la longitud de onda de la luz infrarroja es mayor de 3 000 nm se percibe como calor. La Figura 4.1 muestra cómo el espectro electromagnético es dividido en distintos tipos de energía.

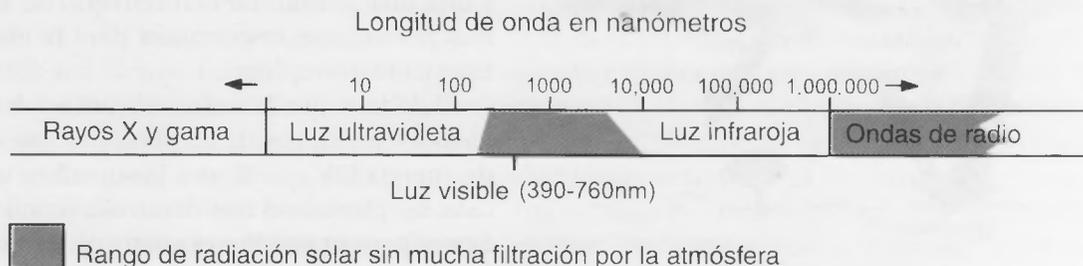


FIGURA 4.1

El espectro electromagnético. El sol emite todo el espectro de energía electromagnética, pero la atmósfera refleja y filtra la mayor parte de la radiación de onda corta, mucha de la infrarroja y las ondas radiales con longitudes más grandes. Una banda relativamente pequeña de energía centrada en el espectro de la luz visible alcanza la superficie de la tierra sin mayor dificultad.

LA ATMÓSFERA COMO FILTRO Y REFLECTOR

Cuando la luz del sol llega a la capa exterior de la atmósfera terrestre, ésta contiene aproximadamente 10 % de rayos ultravioleta (UV), 50% de luz visible y 40% de luz infrarroja (IR) o energía calórica. Cuando esta luz interactúa con la atmósfera terrestre, varias cosas pueden suceder, como se muestra en la Figura 4.2.

Parte de la luz se dispersa o se disemina – su trayectoria hacia la superficie se altera como consecuencia de la interferencia de las moléculas en la atmósfera, pero esta longitud de onda no cambia en el proceso. La mayoría de la luz que es dispersada llega a la superficie, pero en el proceso da a la atmósfera su color azul único. Parte de la luz se refleja fuera de la atmósfera, hacia el espacio; su longitud de onda también es inalterada en el proceso. Finalmente, parte de la luz es absorbida por: el agua, el polvo, el humo, el ozono, el dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera. La energía absorbida se almacena durante un periodo de tiempo y luego, es reirradiada como energía calórica en ondas mayores. Casi todos

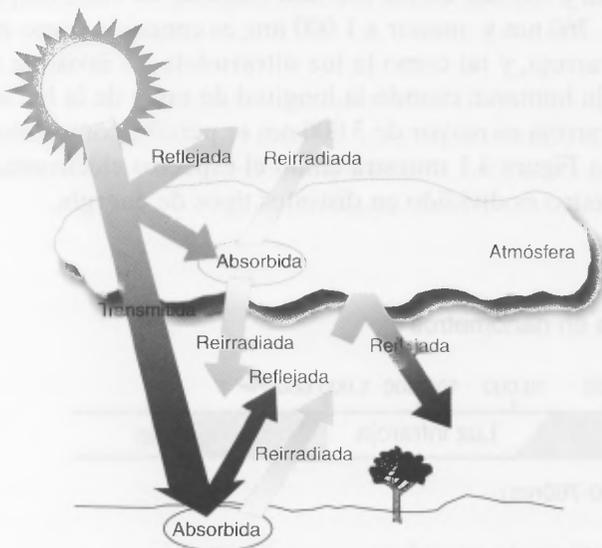


FIGURA 4.2

El destino de la luz cuando alcanza la tierra. La mayor parte de la luz del sol transmitida es luz visible; la mayoría de la energía reirradiada es infrarrojo.

los rayos UV, con longitud de onda de 300 nm o menos, son absorbidos por la atmósfera terrestre antes de que lleguen a la superficie. (Los rayos UV con una longitud de onda inferior a 200 nm son potencialmente letales para los organismos vivos). La luz que no se refleja fuera de la atmósfera o no se absorbe, se transmite y llega a la superficie terrestre. Esta energía es principalmente luz visible, pero también incluye luz ultravioleta e infrarroja.

En la superficie terrestre, la luz transmitida es absorbida por el suelo, el agua y los organismos. Parte de la energía absorbida se refleja de regreso a la atmósfera y parte se reirradia como calor. Lo que nos interesa es la absorción de la luz visible por parte de las plantas y su función en la fotosíntesis.

IMPORTANCIA ECOLÓGICA DE LA LUZ EN LA TIERRA

Todas las longitudes de onda de luz que llegan a la superficie terrestre son importantes para los organismos vivos. Durante la evolución, los organismos han desarrollado diferentes adaptaciones para los distintos espectros. Estas adaptaciones varían desde la capacidad de capturar en forma activa la energía hasta la prevención deliberada a la exposición de energía solar.

Luz Ultravioleta

No obstante que la luz ultravioleta no puede ser vista, ésta participa activamente en ciertas reacciones químicas de las plantas. Junto con las longitudes de onda más cortas de luz visible, la luz ultravioleta promueve la formación de los pigmentos vegetales antocianinas, y está relacionada con la inactividad de algunos sistemas hormonales importantes para la elongación del tallo y el fototropismo.

Debido a que la radiación ultravioleta puede ser dañina a los tejidos de las plantas y que el nivel total de energía UV que llega a la superficie es muy reducido, las plantas no han desarrollado muchas adaptaciones para su uso. Por el contrario, la radiación UV es en gran parte evitada: la epidermis opaca de la mayoría de las plantas retiene la radiación UV más dañina, para que no entre a los tejidos o células sensibles. La reducción de la capa de ozono de la atmósfera es motivo de preocupación por los efectos negativos que el exceso de UV causa a plantas y animales.

TEMA ESPECIAL

Disminución del Ozono

Aproximadamente el 1% del total de rayos ultravioleta que entran en la atmósfera exterior de la Tierra llegan a la superficie. El resto es absorbido por una capa gaseosa de ozono en la atmósfera. Eventualmente los organismos son completamente dependientes de la filtración que hace la capa de ozono, porque la mayoría no dispone de mecanismos de protección contra los efectos nocivos de los rayos UV, tales como las quemaduras, el cáncer y las mutaciones letales.

Cuando los rayos ultravioleta atraviesan una molécula de ozono (O_3), esta se desintegra, se absorbe la energía de la UV y se forma una molécula de oxígeno (O_2) y un átomo de oxígeno libre, llamado radical libre. El radical libre de oxígeno es extremadamente reactivo; sin embargo, fácilmente se combina con una molécula de oxígeno para volver a formar una molécula de ozono. Cuando esta reacción sucede, la energía se libera en forma de calor. De esta manera, la absorción de rayos ultravioleta en la capa de ozono conlleva a la destrucción y formación continua de este gas y a la transformación de los rayos UV en energía calórica (luz infrarroja). Existen suficientes moléculas de ozono para interceptar casi la totalidad de la luz UV que la atraviesa.

La capa de ozono se encuentra en la estratosfera externa, que comienza aproximadamente 20 kilómetros sobre el nivel del mar y se extiende por 30 km más allá del espacio. La estratosfera es la zona espesa y turbulenta de la atmósfera, responsable de nuestro estado del tiempo (clima) y está muy distante de la mayoría de las actividades humanas y las fuentes de contaminación en la superficie. Sin embargo, los seres humanos afectan esta capa.

Durante muchos decenios, hemos producido gases artificiales llamados clorofluocarbonos para ser empleados como enfriadores en los refrigeradores, en los equipos de aire acondicionado y para hacer espuma plástica. Estos gases han sido liberados de los sistemas de enfriamiento y se han dispersado a la atmósfera. Una vez que entran a la atmósfera, lentamente se mueven a la estratosfera.

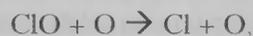
En la estratosfera, los rayos UV bombardean las moléculas de clorofluocarbono y eventualmente fraccionan cada una de ellas, formando un radical libre de cloro. Estos radicales formados en este proceso de fotodisociación destruyen las moléculas de ozono, formando óxido de cloro y oxígeno molecular (O_2).



El óxido de cloro formado de esta manera, tiene la posibilidad de reaccionar y destruir también el ozono.



Peor aún, cada molécula de óxido de cloro puede reaccionar también con uno de los radicales libres de oxígeno, que son constantemente generados por la absorción de rayos UV por el ozono, impidiendo que el radical libre de oxígeno reforme el ozono y se regenera el radical libre de cloro.



Como el radical libre de óxido de cloro se puede regenerar, se estima que uno solo de ellos, puede destruir hasta 100 000 moléculas de ozono, antes que éste reaccione con una molécula de ozono para formar el dióxido de cloro (ClO_2) que es relativamente estable.

El bromo tiene un efecto similar en el ozono. Una fuente importante de este químico en la atmósfera es el bromuro de metilo, un agroquímico empleado para fumigar y esterilizar el suelo antes de la siembra de algunos cultivos como la frambuesa.

Si bien, muchos países han prohibido la producción de la mayoría de los clorofluocarbonos, éstos se siguen utilizando en todo el mundo y, excepto los modelos más recientes de refrigeradores y equipos de aire acondicionado, todos los otros contienen estos gases que destruyen el ozono. Además, el bromuro de metilo se sigue utilizando ampliamente en la agricultura, y en la fumigación de casas para eliminar las termitas.

Los investigadores han estado dando segui-

miento a la capa de ozono desde los años 70. Aunque la concentración de este gas varía de manera natural año con año, se ha observado una marcada disminución estacional por lo menos, desde el verano de 1984, cuando se detectó un agujero en la capa de ozono sobre la Antártida.

Es difícil predecir cuánto se deteriorará la capa de ozono en el futuro y existe desacuerdo entre la comunidad científica sobre cuánto se deteriorará ésta antes de que se comiencen a presentar consecuencias de una mayor exposición a los rayos UV. De acuerdo con algunos, ya se está llegando a ese punto.

Un ligero incremento en la exposición a los rayos UV es dañino para las plantas. Demasiada radiación UV puede dañar las células foliares, inhibir la fotosíntesis, el desarrollo y provocar mutaciones. Los diferentes cultivos tienen distintos niveles de sensibilidad a la exposición de rayos UV, pero aún, si solo algunos cultivos no pueden desarrollarse, el efecto en la producción mundial de alimentos podría ser dramático. Si la radiación UV se incrementa significativamente, la agricultura en todo el mundo podría estar amenazada, además de los ecosistemas naturales terrestres y marinos.

Radiación Fotosintéticamente Activa

La energía luminosa del espectro visible es la más importante para los agroecosistemas. Dependiendo de las condiciones locales del clima, ésta constituye entre 40% y 60% de la energía total irradiada sobre la superficie terrestre. Esta también es conocida como radiación fotosintéticamente activa (RAFA) y su longitud de onda se ubica de 400 a 760 nm. Las plantas verdes no se desarrollan sin una combinación de la mayoría de las longitudes de onda de luz en el espectro visible.

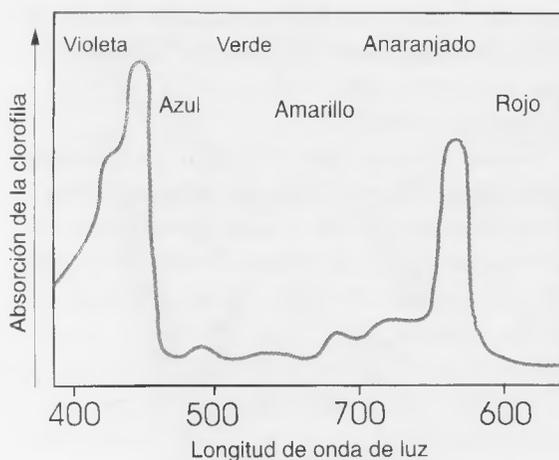


FIGURA 4.3

Absorción de clorofila en relación con la longitud de onda de la luz.

La clorofila absorbe más la luz azul-violeta y rojo-anaranjado; por tanto, el follaje refleja la luz verde y amarillo.

De cualquier modo, no toda la luz en este espectro tiene igual importancia para la fotosíntesis. Los fotoreceptores en la clorofila absorben más luz azul-violeta y rojo-anaranjado; la luz verde-amarilla no es tan necesaria. Como la clorofila no puede absorber bien la luz verde, la mayoría se refleja, haciendo que las plantas parezcan verdes. La Figura 4.3 muestra cómo varía la absorción de la clorofila con respecto a la longitud de onda. La clorofila absorbe mejor la luz que corresponde a las longitudes de onda con las cuales la fotosíntesis es más eficiente.

Luz Infrarroja

La energía de la luz infrarroja con una longitud de onda que va de 800 a 3000 nm – algunas veces señalada como el rango cercano de la infrarroja – tiene un papel importante en la activación de las hormonas asociadas con la germinación, las respuestas de las plantas al cambio de la duración del día y otros procesos de las plantas. En el rango superior a los 3000 nm, la luz infrarroja se calienta y diferentes impactos ecológicos son evidentes. (En el Capítulo siguiente se analiza la temperatura como un factor ecológico).

CARACTERÍSTICAS DE LA EXPOSICIÓN A LA LUZ VISIBLE

La energía de la luz en el rango visible o RAFA es convertida mediante la fotosíntesis en energía química y eventualmente, en la biomasa que hace funcionar al

resto del agroecosistema, incluyendo lo que es cosechado para consumo. Para incrementar la eficiencia de este proceso, es importante comprender cómo puede variar la luz a la cual están expuestas las plantas.

Calidad

La luz visible puede variar en la cantidad de colores que la forman – esto es lo que se denomina como la calidad de la luz. La mayor cantidad de luz solar directa sobre la superficie de la tierra está en la parte central del espectro de la luz visible, cuyos extremos son violeta y rojo. La luz difusa que viene del cielo – como la que se proyecta en la sombra de un edificio – es principalmente luz azul y violeta. Debido a que diferentes partes del espectro de la luz visible es usada en la fotosíntesis con mayor eficiencia que otros, la calidad de la luz tiene un efecto importante en la eficiencia de este proceso.

Diferentes factores hacen que la calidad de la luz varíe. Por ejemplo, en algunos sistemas de cultivo las especies del dosel remueven la luz roja y azul, dejando básicamente pasar la luz rojo oscuro y verde. Por lo tanto, la calidad de la luz puede ser un factor limitante para las plantas bajo el dosel, aun cuando la cantidad total de luz parezca ser adecuada.

Intensidad

El contenido total de energía de toda la luz en el rango de la RFA que llega a la superficie foliar es la intensidad de esa luz. La intensidad de la luz puede expresarse en diferentes unidades de energía, pero las más usadas son “Langley” (calorías por cm^2), el Watt (Joules por segundo) y el Einstein (6×10^{23} fotones). Todas estas unidades de medida expresan la cantidad de energía en una superficie durante un periodo de tiempo. Cuando la intensidad de luz es muy alta, los pigmentos fotosintéticos llegan a saturarse, lo que demuestra que la cantidad adicional de luz no incrementa la tasa de fotosíntesis. Este nivel de intensidad de luz se conoce como **punto de saturación**. La luz excesiva puede causar la degradación de los pigmentos de la clorofila y dañar el tejido de la planta. Por el contrario, un nivel bajo de luz puede causar que la planta alcance el **punto de compensación de luz**, o sea el nivel de intensidad de luz donde la cantidad de fotosintatos producidos es igual a la cantidad

requerida para la respiración. Cuando la intensidad de luz está por debajo del punto de compensación, el balance de energía de la planta es negativo. Si el balance negativo no es superado en un periodo de actividad fotosintética y de absorción de la energía, la planta puede morir.

Duración

El tiempo en que la superficie de las hojas está expuesta a la luz solar durante cada día, puede afectar la tasa fotosintética así como el crecimiento y el desarrollo de la planta a largo plazo. La duración de la exposición a la luz también es una variable importante de cómo la intensidad o calidad de esa luz puede afectar a la planta. Por ejemplo, la exposición a un nivel excesivo durante corto tiempo puede ser tolerada, pero por mucho tiempo puede resultar dañina. También la exposición a la luz intensa durante un breve tiempo, ocasiona que la planta produzca un exceso de fotosintatos, que le permite tolerar durante más tiempo el punto de compensación de luz.

El número total de horas de luz por día –el **fotoperíodo**– también es un aspecto importante de la duración de la exposición a la luz. Una variación de respuesta de la planta, como se discutirá en detalle a continuación, tiene detonadores químicos específicos o mecanismos de control que pueden ser activados o desactivados dependiendo del número de horas de luz solar o en algunos casos, el número de horas sin luz solar.

DETERMINANTES DE LAS VARIACIONES DE LA LUZ NATURAL

La cantidad y calidad de luz recibida por una planta en un lugar específico y la duración de la exposición a la luz, están en función de ciertos factores importantes entre los que se destacan: 1) la estación del año, 2) la latitud, 3) la altitud, 4) la topografía, 5) la calidad del aire y 6) la estructura del dosel de la vegetación.

Las Estaciones del Año

Con excepción del Ecuador, hay más horas de luz solar en verano y menos en invierno, alcanzando los extremos en los solsticios correspondientes. Debido a que el ángulo del sol en relación con la superficie de

la Tierra está mucho más bajo hacia los polos durante el invierno, la luz solar tiene que pasar a través de la atmósfera antes de llegar a la planta, lo cual la hace mucho menos intensa. Por lo tanto, la intensidad y la duración de la luz son afectadas por las estaciones del año. Muchas plantas se han adaptado a las variaciones estacionales durante el día y a la intensidad de la luz mediante la selección de adaptaciones que las preparan para el próximo invierno, o para aprovechar las mejores condiciones para el crecimiento y desarrollo en el período entre la primavera y el verano. El período para realizar muchas actividades agrícolas –como la siembra y la poda– se hacen durante períodos específicos del año cuando cambia el número de horas de luz en el día.

Latitud

Mientras más cercano se esté de los polos, mayor será la variación estacional durante el día. En el círculo polar ártico, los períodos de 24 horas de luz en el verano están equilibrados por períodos de 24 horas de noche en el invierno. Cerca del Ecuador, la constancia de días de 12 horas durante el año crea un ambiente luminoso, que promete una productividad primaria neta elevada durante todo el año y permite una agricultura que se caracteriza por múltiples siembras durante el ciclo de cultivo anual, o una abundancia de cultivos perennes que proporcionan una combinación o cosechas sucesivas durante todo el año.

Altitud

La altitud incrementa la intensidad de la luz porque la atmósfera más delgada absorbe y dispersa menos luz. Las plantas que crecen en zonas más altas, por lo tanto, están más propensas a condiciones de saturación de luz y enfrentan mayor riesgo de degradación en su clorofila que las plantas que crecen a nivel del mar. Muchas plantas de zonas elevadas han desarrollado una coloración reflectiva, y pelos o escamas protectoras en las cutículas de la hoja para reducir la cantidad de luz que penetra.

Topografía

La inclinación y dirección de la superficie del suelo pueden crear variaciones localizadas en la intensidad

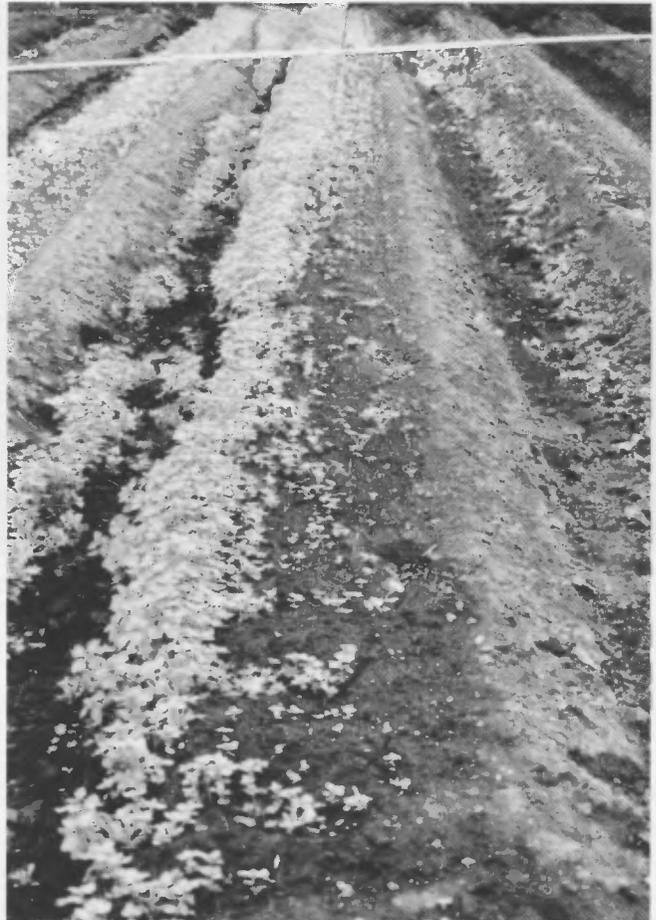


FIGURA 4.4
Concentración del crecimiento de arvenses concentrado en la parte norte del surco. Como esta parte del surco recibió menos luz que la parte sur, se mantuvo más fresco y húmedo, favoreciendo el desarrollo de estas arvenses.

y duración de la exposición a la luz solar. Aunque los efectos de la temperatura de esta variación tienen mayor importancia, las pendientes pronunciadas, orientadas hacia los polos, reciben una radiación directa significativamente menor que otros sitios. Generalmente la orientación de las pendientes es más importante en los meses de invierno, cuando una ladera u otra formación topográfica puede proyectar sombra sobre la vegetación. En los sistemas agrícolas, la menor variación topográfica puede crear sutiles diferencias en el microclima que afecta el desarrollo de las plantas, especialmente cuando éstas todavía son muy pequeñas.

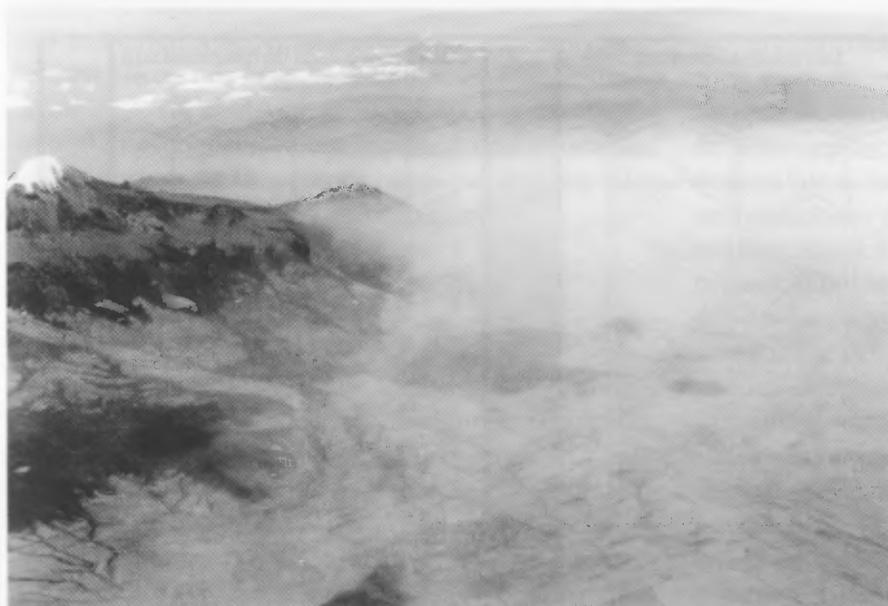


FIGURA 4.5
Contaminación en el Valle de México. El alto nivel de contaminación del aire en este valle circundado por montañas, afecta la calidad de luz en el suelo. Uno de los conos del Volcán Ixtacihuatl se ubica por arriba de la contaminación.

La Calidad del Aire

Los materiales suspendidos en la atmósfera tienen un efecto importante de filtro. El humo, el polvo y otros agentes contaminantes producidos de manera natural o por la acción humana, interfieren significativamente en la actividad fotosintética, al reducir la cantidad de energía luminosa que llega a las hojas, al cubrirla o al reducir la cantidad de luz que penetra la cutícula. Los problemas de la calidad del aire son bastante frecuentes en las regiones industriales o urbanas y sus alrededores. Pero la mala calidad del aire asociada con actividades agrícolas como la quema y la alteración del suelo también se presenta. La horticultura en invernaderos es especialmente afectada por la deposición de partículas del aire sucio. Aún cuando el cristal esté limpio éstas reducen el paso de luz aproximadamente en 13%.

Estructura del Dosel

Una hoja promedio permite la transmisión de aproximadamente el 10% de la luz que incide en la superficie. Dependiendo de la estructura del dosel de la vegetación, las hojas pueden superponerse unas con

otras en mayor o menor extensión, añadiéndose a la densidad del dosel y reduciendo tanto la cantidad como la calidad de la luz que eventualmente incide en la superficie del suelo. Al mismo tiempo, sin embargo, una considerable cantidad de luz solar puede pasar entre las hojas o a través de los espacios disponibles entre ellas, cuando el viento mueve el dosel y cuando el sol se mueve en el cielo. Parte de esa luz adicional entra como si fueran relámpagos difusos (luz celeste) y otra parte de la luz entra directamente del sol y forma manchas solares (pequeñas manchas de luz apenas perceptibles y comúnmente en movimiento). Desde el punto de vista agrícola, es importante entender cómo la luz cambia dentro del dosel, especialmente en los siste-

mas intercalados, los sistemas agroforestales y aún, el manejo de especies no cultivadas en el interior de un sistema de cultivo.

La **tasa relativa de transmisión de luz** de un dosel se expresa como el promedio de la cantidad de luz que puede penetrar el dosel, como porcentaje del total de incidencia de luz en el dosel o en la superficie de un área adyacente libre de vegetación. Ya que sabemos que el cambio en el promedio de penetración de luz depende de la densidad del follaje y de la posición de las hojas, otra forma de determinar el potencial de absorción de luz en un dosel es medir el **índice de área foliar (IAF)**. Esto se hace calculando la superficie total del área de las hojas sobre una superficie de suelo; puesto que las unidades de ambas son idénticas (m^2), el IAF es una medida del total de la cubierta sin unidad. Por ejemplo, si el IAF se determina en 3,5, el área determinada está cubierta por el equivalente a 3,5 capas de hojas en el dosel, lo que implica que la luz tendrá que pasar por muchas hojas antes de tocar el suelo. Sin embargo, el espesor de cada capa, es un factor determinante de la reducción de luz cuando ésta atraviesa el dosel.

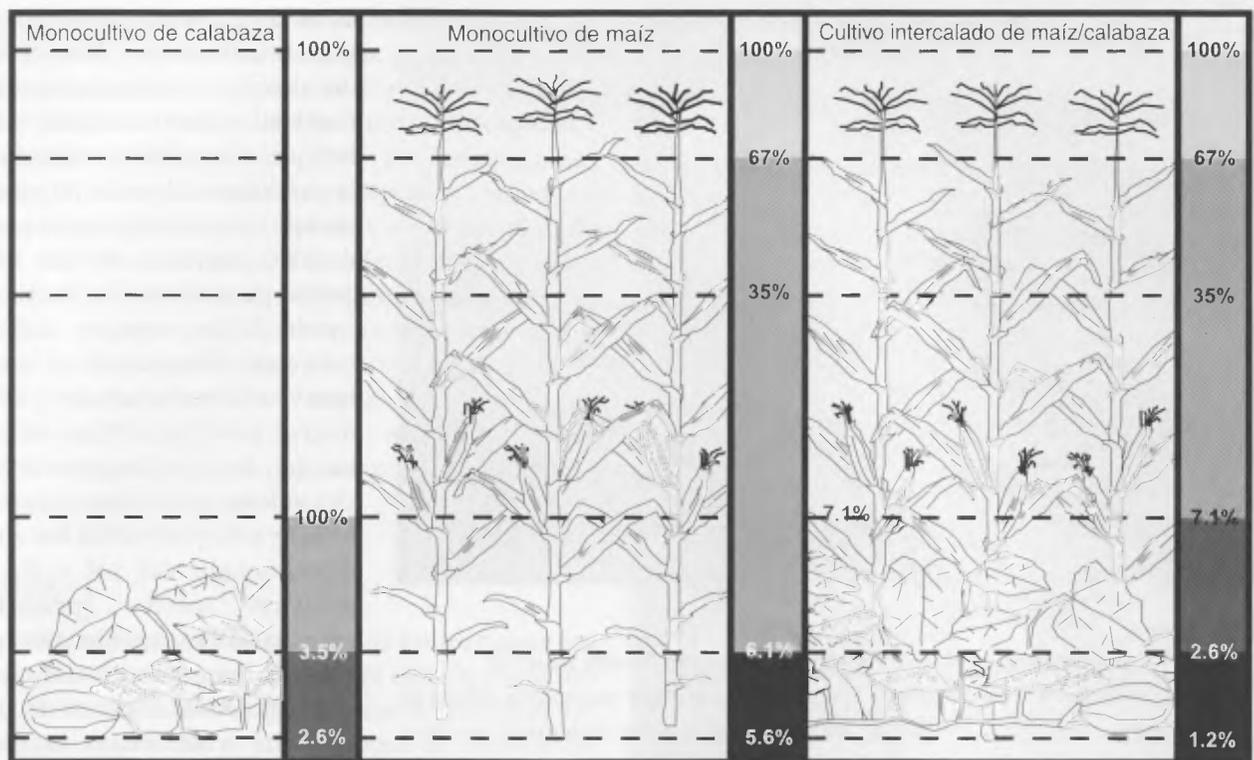


FIGURA 4.6

Atenuación de la luz debajo del dosel de un monocultivo de calabaza, un monocultivo de maíz, y un sistema de cultivo intercalado maíz/calabaza. Los datos para cada cultivo muestran el porcentaje de luz solar total que llega en cada uno de los niveles horizontales. Fuente: Fujiyoshi (1997).

No solamente es la medida más lógica de la reducción de la intensidad de la luz total que penetra a la cobertura vegetal, sino que la calidad de esa luz también cambia. La "luz de la sombra" (penumbra) generalmente tiene una cierta cantidad de luz roja y azul y una cantidad relativamente alta de luz verde y de luz IR. Este efecto se acentúa, particularmente, bajo los doseles perennes de hojas abundantes. Los bosques de coníferas, por otra parte, tienen mucho más luz roja y azul en el suelo del bosque por la estructura de las hojas (agujas) y al hecho de que ellas son mucho más reflectivas que absorbentes y transmisoras de luz visible.

Dadas las variaciones extremas en la estructura del dosel entre vegetaciones naturales y los sistemas de cultivo, los niveles de luz dentro de los doseles también son muy variables. Esto puede variar en un rango que va desde un porcentaje bajo de luz total, a nivel del suelo en un bosque denso, hasta casi el 100% de luz total en un sistema de cultivo, durante

sus primeras etapas de desarrollo. La intensidad de luz en un cultivo de algodón totalmente desarrollado se reduce al 30% de la luz solar total, en el punto medio entre la cima del dosel y la superficie del suelo, y es menor al 5% de la luz total en la superficie del suelo. Las formas en las que un cultivo de calabaza, de maíz y de un cultivo intercalado de maíz/calabaza modifican la calidad de luz natural bajo sus doseles se ilustra en la Figura 4.6.

TASA FOTOSINTÉTICA

Una vez que la luz es absorbida por la hoja y se activan los procesos en el cloroplasto, lo cual eventualmente lleva a la producción de azúcares ricos en energía, las diferencias en la tasa real de fotosíntesis son importantes. La tasa fotosintética está determinada primero por tres conjuntos diferentes de factores: 1) la etapa de desarrollo de la planta, 2) las condicio-

nes ambientales del entorno de la planta, incluyendo las condiciones de luz y, 3) el tipo de proceso fotosintético (C3, C4 o MAC) empleado por la planta. Es importante conocer cuáles aspectos determinan las variaciones en la tasa fotosintética para manejar las condiciones de luz en los agroecosistemas.

La Eficiencia Fotosintética y los Factores Ambientales

Como cualquier respuesta de la planta, la fotosíntesis es afectada por las condiciones ambientales. Éstas condiciones incluyen la temperatura, la intensidad y calidad de la luz, el tiempo de exposición a la luz, la presencia de dióxido de carbono, la humedad y el viento. Para cada uno de estos factores, la planta tiene tolerancias máximas y mínimas así como condiciones óptimas con las cuales la fotosíntesis es más eficiente. Los efectos de esos factores se tratarán en forma detallada en los siguientes capítulos.

En general se puede decir que gran parte de la estructura y función de cada planta se ha desarrollado en el tiempo por la eficiencia fotosintética. Pero a pesar de una serie de adaptaciones, desde la estructura de la hoja hasta los procesos químicos, solamente un porcentaje pequeño de la energía solar disponible es capturada en este proceso. La mayoría de las hojas alcanzan la saturación con solamente el 20% de la luz solar total. De la energía solar absorbida por las hojas, solo aproximadamente el 20% se convierte en energía química en las moléculas de azúcar. Esto permite a la fotosíntesis una eficiencia, en teoría, de aproximadamente 4%, la cual puede disminuir aún más cuando disminuye el dióxido de carbono alrededor de la hoja. Además, solo una parte de la energía en los fotosintatos es realmente convertida en biomasa, reduciendo la eficiencia del proceso total entre 1% y 3%. Ya que todavía tenemos que encontrar formas de alterar el proceso fotosintético, se hace más importante tratar de mantener las condiciones ambientales lo más óptimamente posible, así como seleccionar las plantas a cultivar de acuerdo con el ambiente en particular.

Diferencias en los Procesos Fotosintéticos

La investigación que nos ha permitido comprender los diferentes tipos de procesos fotosintéticos y sus condiciones óptimas de funcionamiento, también nos

ha permitido mejorar el proceso de selección de cultivos para diferentes localidades. En las plantas C4 los índices fotosintéticos más elevados, la virtual falta de foto-respiración y las adaptaciones morfológicas (vainas intercaladas) se combinan para darles ventajas en condiciones de elevada intensidad de luz y temperaturas cálidas. Ambas condiciones, frecuentemente, se presentan también en situaciones de humedad limitada. Por lo tanto, aún bajo alteraciones por estrés de humedad y del cierre de los estomas, las plantas C4 pueden continuar fotosintetizando con el dióxido de carbono producido internamente, por su capacidad de mantener el proceso aún por debajo de su punto de compensación de dióxido de carbono. Sin embargo, las plantas C4 están de alguna forma limitadas a las condiciones de alta intensidad de luz y de calor. Las plantas C3 tienen una distribución mucho mayor y mejor capacidad para vivir en condiciones con menor temperatura, sombra y variación climática. Los investigadores están buscando la manera de combinar los cultivos C3 y C4 en el mismo sistema de cultivo, así como desarrollar las rotaciones C3-C4 que reflejen las condiciones cambiantes de crecimiento que se dan según la temporada del año.

Medición de la Tasa Fotosintética

La medición de la tasa fotosintética en el campo nos permite cuantificar la eficiencia de la energía capturada en diversos cultivos. La medida más precisa es la del intercambio real de gas en la planta. Una sola hoja, parte de una planta o toda la planta se coloca en una cámara transparente donde las condiciones se mantienen lo más semejante posible a su ambiente natural y se pueden cuantificar. El aire pasa a través de la cámara y dentro de un analizador infrarrojo de gas (IRGA) de tal forma que se puedan determinar los cambios en el contenido del dióxido de carbono liberado por el balance de respiración-fotosíntesis.

La otra forma de medición se basa en la ganancia de peso de la biomasa seca de toda la planta, o la determinación de la correlación entre la ganancia de peso de alguna parte específica de la planta y el total de ésta, durante el tiempo. Para un cultivo anual que comienza como una semilla y completa su ciclo de vida en una estación del año, la actividad fotosintética neta se relaciona directamente con el peso seco de la planta a la cosecha. Para las plantas perennes, alguna

parte de la planta tiene que ser recolectada y por medio del uso de modelos de desarrollo de toda la planta y la distribución de la biomasa, se determinan los valores aproximados de la actividad fotosintética. El IAF, anteriormente descrito, también se puede emplear para estimar el área potencial de hoja disponible para la fotosíntesis en un sistema de cultivo y luego, con base en nuestros conocimientos sobre los índices fotosintéticos aproximados para cada planta o partes de ella, se puede calcular el índice fotosintético para todo el sistema.

OTRAS FORMAS DE RESPUESTA A LA LUZ

Las plantas responden a la luz en otras formas, además de utilizarla para producir azúcares ricos en energía. La luz tiene influencia en la planta desde la germinación de las semillas hasta la producción de nuevas semillas.

Germinación

Las semillas de muchas plantas requieren luz para germinar; cuando son enterradas germinan muy pocas. Una sola y breve exposición a la luz, de hecho, como sucede durante la preparación del terreno para la siembra, cuando la semilla de alguna arvense es llevada a la superficie e inmediatamente enterrada de nuevo, puede ser suficiente para inducir la germinación. Otras semillas necesitan exposiciones repetitivas, o aún constantes para germinar. La lechuga es quizás uno de los mejores ejemplos de que en las especies cultivadas la germinación de las semillas sin exposición a la luz, se reduce aproximadamente 70% o más. Las semillas de otras plantas, como las de diversas cucurbitáceas, tienen necesidades opuestas. La semilla debe ser enterrada totalmente para germinar porque la luz realmente inhibe la germinación. En todos estos casos, una hormona sensible a la luz controla la respuesta.

Crecimiento y el Desarrollo

Una vez que una semilla germina, la planta recién emergida inicia el proceso de crecimiento y desarrollo. En cualquier etapa del proceso, la intensidad o tiempo de exposición a la luz controla las respuestas de la planta, tanto como una respuesta a un estímulo o como un factor limitante.

Establecimiento

El establecimiento de las primeras plántulas puede ser afectado por los niveles de luz, especialmente cuando la germinación o el establecimiento ocurre bajo el dosel de plantas ya establecidas. Algunas plantas de vivero son menos tolerantes a la sombra que otras y su establecimiento es difícil cuando no existe la luz necesaria para conseguir el desarrollo de la planta. Un ejemplo de la importancia que tienen las diferencias en la tolerancia a la sombra son las plántulas de pino blanco y de arce dulce (sugar-maple) en los bosques del este de los Estados Unidos. Las plántulas de pino blanco sufren déficit fotosintético en condiciones de 10% de luz, mientras que las de arce dulce lo hacen a un 3%. Esta diferencia en el punto medio de compensación de luz demuestra que el arce dulce es más tolerante a la sombra que el pino blanco, por tanto en un bosque denso con niveles de luz inferiores al 10%, solo las plántulas de arce dulce pueden reproducirse. La mayor tolerancia a la sombra que tiene el arce dulce puede ser un factor en la sucesión del bosque. Después de la tala, los pinos se establecen primero, pero cuando el bosque se cierra y la sombra se hace más intensa, el arce dulce comienza a establecerse y eventualmente a reemplazar a los pinos.

El Crecimiento de la Planta

Cuando una planta es rodeada por otras, la cantidad de luz que llega a sus hojas se vuelve un factor limitante y comienza la competencia por la luz. Esta competencia se da especialmente en poblaciones de plantas de la misma especie, o en comunidades de plantas con especies muy parecidas con necesidades de luz similares. Si la competencia alcanza el punto en el cual la planta es totalmente cubierta por la sombra de sus vecinas el crecimiento del tallo y de las hojas se limita mucho. Si alguna parte de la planta puede salir de la sombra y alcanza la luz del sol, la fotosíntesis en esa parte puede ser suficiente para compensar la sombra sobre el resto de la planta y lograr un desarrollo adecuado.

Muchas plantas desarrollan hojas diferentes anatómicamente dependiendo del nivel de sombra o de sol. Las hojas en la sombra son más delgadas y tienen mayor superficie por unidad de peso, su epidermis delgada, con menos pigmento fotosintético, la estruc-

tura de la hoja es más absorbente, pero tienen más estomas que las hojas expuestas al sol. Resulta interesante que las hojas expuestas a la sombra, frecuentemente, parecen adaptarse a las condiciones de poca luz ambiental, siendo capaces de realizar la fotosíntesis por encima del punto de compensación, debido en parte, a la mayor superficie para captar la luz. Pero es importante que las hojas en la sombra estén protegidas de los efectos dañinos causados por exceso de luz.

Fototropismo

La luz puede inducir a la planta a sintetizar la clorofila y las antocianinas que estimulan el crecimiento en ciertas partes de la planta, como el pecíolo foliar o el pedúnculo floral, las cuales crecen hacia o en contra de la luz. En algunos casos, este patrón de crecimiento es controlado por una hormona que se activa por la luz azul. Las hojas pueden estar orientadas hacia el sol para capturar más luz o en contra de esta en ambientes de alta luminosidad. Los girasoles reciben su nombre por la orientación característica del disco de la inflorescencia hacia el sol matinal.

Fotoperiodo

Debido a que la tierra está inclinada sobre su eje, la duración relativa de horas luz y horas de oscuridad varía según la época del año. Debido a la correlación de horas de luz y de oscuridad con otros factores climatológicos, especialmente la temperatura, las plantas han desarrollado respuestas de adaptación a los cambiantes regímenes de luz y oscuridad en el tiempo. Los procesos importantes como la floración, la germinación de semillas, la caída de las hojas y los cambios de pigmentación son ejemplos de estas adaptaciones. Un pigmento en las plantas, conocido como fitocromo, es el principal agente fotoreceptor responsable de regular estas respuestas.

El pigmento fitocromo tiene dos formas; una tiene un punto máximo de absorción para la luz roja con una longitud de onda de 660 nm, la otra tiene un punto máximo de absorción para la luz rojo lejano con una longitud de onda de 730 nm. En luz de día, la forma de luz roja se convierte rápidamente en la forma de rojo lejano y en la oscuridad, la forma de rojo lejano se convierte lentamente a la forma roja. El fito-

cromo rojo lejano es biológicamente activo y responsable de las respuestas básicas de las plantas al número de horas de luz o de oscuridad.

En la mañana, después de unos cuantos minutos de exposición a la luz, el fitocromo rojo lejano se hace dominante y permanece así durante el día. Esta dominancia también se mantiene durante la noche, ya que la conversión a fitocromo rojo en la oscuridad es lenta. Por lo tanto, cuando la noche es relativamente corta, no hay suficiente tiempo para que el fitocromo rojo lejano adopte la forma roja y entonces continúa siendo dominante. Sin embargo, cuando el número de horas de oscuridad se incrementa, llega al punto en que la noche es lo suficientemente larga, y permite un cambio de dominancia hacia la forma roja. Aún cuando este período de dominancia del rojo es breve, ocurren cambios en la respuesta de las plantas.

En los crisantemos, por ejemplo, el final de la dominancia continua del fitocromo rojo lejano en otoño, induce el crecimiento de las yemas florales. Este tipo de respuesta se conoce como respuesta de "días cortos", aunque la respuesta real se activa por el aumento de horas nocturnas. Para crisantemos cultivados en invernadero, la importancia del período de oscuridad se acentúa por los breves períodos de luz artificial durante la noche, lo cual induce la conversión del fitocromo rojo lejano suprimiendo la floración.

Las fresas responden totalmente diferente. En la primavera, las noches más cortas permiten que el fitocromo rojo lejano tenga dominancia continua, provocando el cambio de la producción vegetativa a la producción de flores. Las plantas con esta clase de respuesta se llaman plantas "de días largos", aunque son las noches más cortas las que realmente producen el cambio. Las variedades de fresas conocidas como de "día neutro", han sido desarrolladas para ampliar el período de floración hacia el verano y principios del otoño, cuando éstas sufren el cambio en el crecimiento vegetativo característico de las plantas de "días largos".

Producción de la Parte Cultivable de la Planta

Las condiciones de luz natural tienen un papel clave en la producción de la parte de la planta que se desea cosechar. En general, los cultivos han sido seleccionados para separar muchos fotosintatos de las partes de la planta que son cosechadas. En otras palabras, las

partes que se cosechan son los principales sumideros de distribución del carbono. Sin embargo, la capacidad de la planta para producir la biomasa deseada en sus partes cosechables depende de las condiciones de luz en el ambiente. Al entender las complejas relaciones entre la respuesta de la planta y la cantidad, la calidad de luz y el tiempo de exposición como fue discutido, se puede manipular la luz del entorno y seleccionar las plantas, con el objetivo de optimizar la producción total del agroecosistema.

MANEJO DE LA LUZ EN AGROECOSISTEMAS

Existen dos enfoques principales de manejo de la luz en un agroecosistema. En lugares donde la luz, generalmente no es un factor limitante, el manejo se orienta hacia el ordenamiento del sistema para regular los posibles excesos de ésta, mientras que en lugares donde sí es un factor limitante, el enfoque procura que la luz sea suficiente para todas las plantas presentes en el sistema.

Las regiones donde la luz no es un factor limitante, por lo general, son regiones áridas. En estas localidades, el punto clave para determinar la estructura de la vegetación y la organización del sistema de cultivo, es normalmente la disponibilidad del agua y no de la luz. Las plantas están generalmente, más separadas una de la otra, las relaciones de luz son de menor importancia, ya que normalmente hay abundancia de energía solar y muchos organismos desarrollan adaptaciones para evadir la abundancia de luz más que para capturarla. Las hojas comúnmente están orientadas verticalmente para evitar la exposición directa a la luz, tienen menos contenido de clorofila, porque absorben menos energía luminosa y menos calor, contienen elevadas proporciones de pigmentos rojos y reflejan la luz roja que normalmente se absorbe en la fotosíntesis.

La luz es más un factor limitante en las regiones húmedas. Tanto la vegetación natural como los agroecosistemas de las zonas húmedas están más sobrepuestos o estratificados, siendo la cantidad y la calidad de la luz alteradas cuando la luz pasa a través de esos estratos en su trayectoria hacia la superficie del suelo. En estas regiones, el manejo de la luz puede ser un factor importante en la optimización de la productividad de los agroecosistemas. Mientras más estratificada sea la estructura, mayor es el desafío del

manejo de la luz. En los sistemas de silvicultura y de agrosilvicultura, por ejemplo, las plántulas de las especies del dosel, con frecuencia, no germinan bien en el suelo sombreado del bosque, un factor que debe tomarse en cuenta al manejar la diversidad del sistema.

La Selección del Cultivo

Un aspecto del manejo de la luz es lograr adaptar la disponibilidad de luz a la respuesta de la planta a la luz. Los requerimientos de luz de la planta, así como su tolerancia son factores importantes a considerar en la selección del cultivo.

El tipo de proceso fotosintético de los cultivos es el que básicamente determina el requerimiento de luz. Como ya se discutió, las plantas con fotosíntesis tipo C4 necesitan una intensidad de luz elevada y una larga exposición para producir óptimamente, además de que no están bien adaptadas a condiciones frías y húmedas, especialmente a condiciones muy frías durante la noche. Por el contrario, muchas plantas C3 no crecen bien bajo las mismas condiciones de luz que favorecen a las plantas C4.

Por ejemplo, en la costa central de California, donde las frías corrientes oceánicas mantienen normalmente, temperaturas bajas a moderadas durante las noches de verano y neblina por las mañanas, los cultivos C4 como el maíz dulce crecen muy lentamente y pocas veces se obtienen los rendimientos de las plantaciones de los valles del interior del estado, exactamente a 80 km al este. Por el contrario, muchos cultivos C3 como la lechuga crecen muy bien en el clima costero.

La caña de azúcar es un ejemplo de cultivo C4, el cual requiere alta intensidad de luz. Cuando se siembra en áreas con adecuada luz y humedad, este cultivo alcanza uno de los índices más elevados de eficiencia fotosintética. La selección de la variedad, la disposición de los surcos, la densidad de la siembra, manejo de la fertilidad y otros factores se combinan con el índice de 4% de conversión de RFA a biomasa, para producir rendimientos netos elevados (hasta 78 toneladas de materia seca/hectárea/año).

Aún en cultivos con el mismo proceso fotosintético, la selección de cultivos puede ser hecha. Por ejemplo, diferentes puntos de compensación de luz, podrían utilizarse para determinar cuáles cultivos podrían ser seleccionados para ambientes más cerrados.

La Diversidad de Cultivos y Estructura del Dosel

La luz en el interior de un sistema de producción de cultivos varía considerablemente. Estos sistemas pueden ser diseñados para crear zonas donde la luz sea la más apropiada para un cultivo en particular. En el trópico, por ejemplo, los agricultores utilizan totalmente la luz bajo el dosel de los árboles para cultivar café, cacao y vainilla. Los cultivos de cacao y vainilla no toleran el sol directamente durante un lapso de tiempo considerable y con frecuencia, estas especies necesitan tener un dosel que les provea sombra desde el momento en que son sembradas. Sólo hasta hace poco, se han desarrollado algunas variedades de café que pueden cultivarse sin sombra.

En cultivos anuales mixtos, la luz dentro del dosel del sistema cambia cuando los cultivos se desarrollan; el IAF y la intensidad de luz a diferentes niveles sufren una variación considerable en el tiempo. Los agricultores han sabido aprovechar estas condiciones cambiantes. Un ejemplo bien conocido es la tradicional siembra intercalada de maíz-frijol-calabaza en Mesoamérica. En una forma particular de este sistema de cultivos múltiples en el sureste de México (Amador y Gliessman 1990), todos los cultivos se siembran simultáneamente, por lo tanto, cada uno tiene la misma cantidad de luz cuando emergen. Pero el componente maíz inmediatamente domina la estructura del dosel, proyectando su sombra sobre los cultivos de frijol y de calabaza. Cuando el dosel del maíz se cierra, el frijol ocupa hasta las dos terceras partes de la mitad más baja del terreno del maíz. La calabaza es confinada a la zona más oscura del suelo, proyectando aún, una sombra más intensa en la superficie del suelo que ayuda en el control de las arvenses en el sistema (Gliessman 1988a). Aunque el frijol y la calabaza están expuestos a niveles de luz inferiores a la óptima, ambos reciben la cantidad necesaria para producir adecuadamente y no interfieren con las necesidades de luz en el maíz que son bastante elevadas. El maíz es un cultivo C4 y el frijol y la calabaza son C3. Este agroecosistema demuestra que en sistemas de cultivos intercalados se pueden combinar cultivos con diferentes procesos fotosintéticos y la investigación en este aspecto podría aportar más conocimientos.

Los diversos sistemas agroforestales como los huertos caseros son quizás, los ejemplos más complejos del manejo de la luz en los agroecosistemas (Ewel

et al. 1982, Gliessman 1990a); los cuales se discuten detalladamente en el Capítulo 17. Su elevado IAF (3,5-5,0), la diversidad de la distribución de las capas del dosel, la elevada absorción de luz por el follaje (90-95%) y la estructura horizontal irregular debido a su desarrollo consecutivo o a la intervención intencional del hombre, contribuyen a crear un ambiente de luz muy variante, lo cual promueve una diversidad de especies vegetales que es de las más elevadas entre los agroecosistemas. Aún deben estudiarse los requerimientos específicos de luz y la tolerancia de cada componente de este sistema.

Un estudio de la luz en nueve agroecosistemas diferentes en México y Costa Rica, ofrece algunos conocimientos sobre la posible variación de la estructura y características de la luz ambiental. Los resultados de este estudio se presentan en el Cuadro 4.1.

En general, en este estudio los policultivos fueron más eficaces interceptando la luz que los monocultivos, aunque el camote como monocultivo con hojas anchas, interceptó la luz en forma tan eficaz como los huertos caseros y el café sin sombra. Estos resultados mixtos indican la dificultad para determinar el uso eficiente de la luz de un sistema. La sola medición de la cobertura vegetal, del IAF y de la transmisión de la luz a la superficie no muestra cómo los componentes del sistema utilizan la luz. Tampoco esto muestra cómo debe diseñarse un sistema que satisfaga las necesidades de luz de una diversidad de plantas diferentes al mismo tiempo.

Manejo Temporal

Con el tiempo, en un agroecosistema la luz cambia. Los cambios se dan por el crecimiento de las plantas en el sistema, y por los cambios de las estaciones del año. Ambos cambios pueden ser aprovechados, modificados o utilizados como claves para iniciar prácticas específicas.

Una forma de manejo temporal que aprovecha los cambios en la luz en el ambiente y que ocurre cuando un cultivo crece, es la "sobresiembra" de un cultivo en medio de otros. Por ejemplo, esto se hace para producir un cultivo de forraje, leguminosa/avena: en vez de sembrar la avena, cosecharla y luego sembrar la leguminosa de cobertura (como el trébol o la algarroba), las semillas de la leguminosa se siembran cuando la avena tiene un desarrollo determinado y la

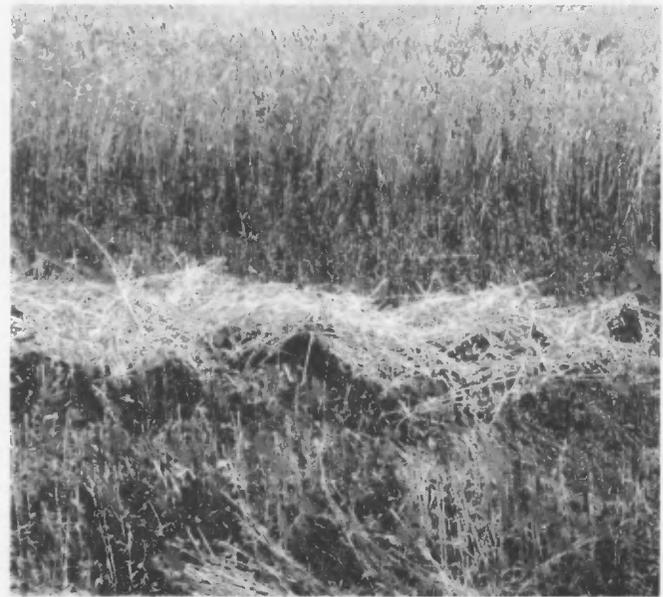
CUADRO 4.1 Medidas de luz medio ambiente en un rango de agroecosistemas y ecosistemas naturales en Costa Rica y México

	Especies	IAF	Cubierta (%)	Transmisión (%)
Monocultivo de maíz de dos meses, manejado convencionalmente	7,0	1,0	56	35
Monocultivo de maíz de 3.5 meses, manejado tradicionalmente	20,0	2,6	88	12
Camote, sin arvenses y con aplicación de insecticidas	8,0	2,9	100	11
Cultivo intercalado de cacao de 2.5 años de edad, plátano y el árbol nativo <i>Cordia alliodora</i>	4,0	3,4	84	13
Huerto casero boscoso con años de establecido y con diversas plantas útiles	18,0	3,9	100	10
Cafetal con dosel de árboles de <i>Erythrina</i>	7,0	4,0	96	4
Parcelas con plantas útiles, con regeneración natural, 11 meses después de la roza	27	4,2	98	7
Plantación de <i>Gmelina</i> (árboles cultivados por la madera y la pulpa en cultivos intercalados con frijol y maíz)	8,0	5,1	98	2
Parcelas que tienen regeneración natural, 11 meses después de la roza.	35,0	5,1	96	<1

Fuente: Ewel *et al.* (1982).

luz es más apropiada para el establecimiento de la leguminosa. Específicamente, la leguminosa se siembra justo antes de que las espigas de la avena comiencen a formarse, cuando los niveles de luz a 7,6 cm sobre el suelo son aproximadamente del 40% del total de luz solar. El trébol parece establecerse mejor con 50% de luz total, así que la sobresiembra que se realiza justo antes de que las espigas comiencen a formarse les impide un buen comienzo. Después de que la avena se ha cosechado, el nivel de luz que llega a las plantas de trébol es casi el total, lo cual promueve el rápido crecimiento de esta especie como un cultivo de cobertura capaz de fijar nitrógeno.

El manejo de las variaciones de luz en las estaciones del año es común en los sistemas de cultivos perennes y agroforestales. Los sistemas cafetaleros en Costa Rica –en donde se realizan muchas investigaciones del manejo de la sombra– son un buen ejemplo de esta forma de manejo de luz temporal (Lagemann y Heuvelodop 1982). Como ya se discutió, el café comúnmente crece bajo sombra de árboles, con frecuencia de especies del género de la leguminosa *Erythrina*. Aunque el café es una planta que tolera bien la sombra, es afectada cuando ésta se vuelve

**FIGURA 4.7**

En el cultivo asociado avena/trébol, las plantas de trébol quedan expuestas cuando se cosecha la avena, a principios de julio en la granja de investigación Rodale en Kutztown, Pennsylvania, EE.UU. En menos de dos meses, el trébol será cosechado para forraje o incorporado al suelo como abono verde.

muy densa. Esto se da especialmente durante la temporada húmeda del año, cuando la humedad relativa en el sistema es de aproximadamente 100% durante el tiempo, lo cual promueve la aparición de enfermedades fungosas que pueden causar defoliación y caída del fruto. Por lo tanto, una práctica común es podar casi completamente los árboles que dan sombra al principio de la época húmeda (en el mes de junio), para permitir que entre más luz, creando condiciones más secas y por lo tanto, evitando el riesgo de enfermedades. La mayor nubosidad durante la época húmeda reduce la necesidad de sombra sobre el café. Casi al final de la época húmeda (generalmente noviembre y diciembre) se hace otra poda menos intensa para que nuevamente se abra el dosel de la plantación, lo cual posiblemente promueva el desarrollo de los botones florales que se abren en la época seca, pero también estimulan el intercambio de la biomasa rica en nitrógeno que contribuye a un rápido crecimiento de las plantas de café durante ese período.



FIGURA 4.8

*Árboles de sombra podados en una plantación de café en Turrialba, Costa Rica. Los árboles usados comúnmente para sombra (*Erythrina poeppigiana*) son podados totalmente a principios de la época lluviosa, para tener más luz en el interior de la plantación de café durante la época más nublada y lluviosa del año.*

Distribución del Carbono y la Sostenibilidad

Como ya se discutió en el Capítulo 2, un porcentaje relativamente pequeño del carbono, fijado por la fotosíntesis, se convierte en carbohidratos y eventualmente se transforma en biomasa. Para la agricultura, es de gran importancia esa parte de esa biomasa que en forma de materia orgánica puede ser comerciable, cultivable y/o consumible. Todas estas discusiones de cómo se puede manejar la luz ambiental para incrementar el tamaño de ese sumidero de carbohidratos deben también considerar cuáles son los impactos a largo plazo de cosechar y remover esta biomasa del agroecosistema.

La experiencia de los productores de maíz de Puebla, México es un ejemplo interesante de cómo el incremento de la proporción de carbono en el material cosechable no es necesariamente positivo. Muchos de los pequeños agricultores tradicionales de la región comenzaron a utilizar variedades de maíz de alto rendimiento, durante la “revolución verde” a finales de los años 60 y principios de los 70. Estas variedades han sido mejoradas para producir más grano a expensas de la biomasa comúnmente almacenada en

otras partes de la planta —especialmente en los tallos y las hojas. Después de plantar estas variedades durante algunos años, los agricultores volvieron a usar sus variedades tradicionales de maíz. Debido a que estos agricultores usaban exageradamente animales en sus sistemas agrícolas (especialmente para el cultivo y el transporte) y a que el maíz forrajero era un alimento suplementario importante para los animales, la reducción de tallos y hojas en las nuevas variedades no permitían la producción de alimento requerido para ellos. En este caso, la mayor cantidad de carbono en la cosecha no consideró la sostenibilidad de todas las partes del agroecosistema.

Este mismo proceso puede ocurrir con otros cultivos. Las

variedades tradicionales de arroz, por ejemplo, almacenan cerca del 90% de su carbono en las hojas, los tallos y en las raíces, mientras que las nuevas variedades han elevado el carbono almacenado en los granos hasta en más de 20% (Gliessman y Amador 1980). En coberturas donde la paja del arroz juega un papel importante en el agroecosistema, como material de construcción, combustible, o alimento para los animales, las necesidades humanas decidirán si es importante la transición a variedades que sacrifican la biomasa de algunas partes para incrementar la de los granos de arroz. Dentro del agroecosistema mismo, debemos comprender también los posibles impactos de esta "pérdida" de materia orgánica en los componentes ecológicos, tales como la conservación de la materia orgánica del suelo, la estabilidad de agregados del suelo, la actividad biológica en el suelo, y la salida de nutrimentos que son esenciales para la sostenibilidad del agroecosistema a largo plazo.

Investigaciones Futuras

Se requiere mucha investigación sobre el manejo de la luz en los agroecosistemas. Acabamos de aprender bastante acerca de los procesos fotosintéticos, la distribución del carbono y cómo incrementar el rendimiento de la biomasa cosechable en los sistemas de cultivo. Pero también necesitamos entender que el manejo del agroecosistema requiere que regresemos tanto materia orgánica al sistema, especialmente al suelo, como la que removemos de él. La energía solar absorbida debe contribuir tanto a la sostenibilidad del agroecosistema a largo plazo como a corto plazo. Las investigaciones sobre cómo equilibrar estas necesidades son claves para desarrollar agroecosistemas sostenibles en el futuro.

Ideas para Meditar

1. ¿Cuáles son las diferencias básicas entre mucha y poca luminosidad en términos de la respuesta de la planta? ¿Cuáles son algunas de las formas de compensación para cada situación extrema que deben considerarse en el diseño de un agroecosistema?

2. Nuestra comprensión de los diferentes tipos de procesos fotosintéticos que usan las plantas, han resultado principalmente de las investigaciones básicas de laboratorio, pero este conocimiento ha ayudado considerablemente en el manejo de la luz en los agroecosistemas. ¿Qué otros aspectos básicos de investigación, separadas del campo, tienen gran importancia para la sostenibilidad?
3. ¿Cuáles son algunas de las formas más significativas en que el hombre y sus actividades impactan la luz? ¿Cuáles podrían ser las consecuencias para la agricultura en el futuro?
4. La energía lumínica es considerada una de nuestras fuentes de energía renovable más abundante y comúnmente utilizada. ¿Cuáles son algunos de los factores que han reducido el desarrollo de mejores formas de aprovechar esta fuente de energía en la agricultura?

Lecturas Recomendadas

- Bainbrige, R., G.C. Evans and O. Rackham. 1968. *Light as an Ecological Factor*. Blackwell Scientific: Oxford.
- Procedimientos de un simposio internacional de la luz como un factor importante en el ambiente.
- Evans, G.C., R. Bainbrige, and O. Rackam. 1975. *Light as an Ecological Factor: II*, . Blackwell Scientific: Oxford.
- Continuación del simposio de 1968, el cual cubre temas más amplios.
- Hall, D. O., and K.K. Rao. 1995. *Photosynthesis*. Fifth Edition. Cambridge University Press: New York.
- Un texto introductorio excelente sobre el proceso fotosintético a nivel macro y molecular, con un enfoque especial sobre el papel de la fotosíntesis como fuente de alimento y combustible.
- Vicent-Prue, D. 1975. *Photoperiodism in Plants*. McGraw-Hill: New York.
- Un repaso completo sobre la importancia de la luz en términos de la duración del día.

TEMPERATURA

El efecto de la temperatura sobre el crecimiento y el desarrollo de las plantas y los animales es bien conocido y fácilmente demostrado.

Cada organismo tiene ciertos límites de tolerancia para las altas y bajas temperaturas, determinados por su adaptación a las temperaturas extremas. Cada organismo también tiene un ámbito óptimo de temperatura, el cual varía según su desarrollo. Debido a las diferentes reacciones a la temperatura, las papayas no son cultivadas en el ambiente templado, costero y frío de la Bahía de Monterrey en California, y las manzanas no crecerían bien si fuesen plantadas en las tierras bajas, húmedas y tropicales de Tabasco, México.

De esta forma, el ámbito de temperatura y el grado de fluctuación de la misma en un área constituyen límites de las especies y cultivares que un agricultor puede sembrar, y pueden causar variaciones en la calidad y en el rendimiento promedio de los cultivos sembrados. Es necesario considerar el factor temperatura en la selección de los cultivos que son apropiados según el ámbito de condiciones de temperatura que pueden presentarse cada día, entre el día y la noche y de una estación a otra. Las temperaturas sobre el nivel del suelo son tan importantes como las que se registran bajo el mismo.

Cuando medimos la temperatura del aire, del suelo o del agua, estamos determinando el flujo de calor. Con el fin de entender mejor la temperatura como un factor, se debe pensar en el flujo de calor como una parte del presupuesto energético del ecosistema, cuya base es la energía solar.

EL SOL COMO FUENTE DE CALOR Y ENERGÍA PARA LA TIERRA

El flujo de energía proveniente del sol es predominantemente una radiación de onda corta, usualmente considerada como energía luminosa, la cual está compuesta tanto del espectro visible como del invisible. El destino de esta energía, una vez que alcanza la atmósfera de la Tierra fue discutido en los capítulos previos y esquematizada en la Figura 4.2. A manera de revisión, la radiación solar que se recibe es tanto reflectada, como dispersada o absorbida por la atmósfera y sus componentes. La energía reflejada y dispersada tiene pocos cambios, pero la energía absorbida es convertida a una forma de energía de onda larga que se manifiesta como calor. De igual forma, la energía de onda corta que alcanza la superficie de la Tierra es tanto reflejada como absorbida. El proceso de absorción en la superficie, por el cual la energía luminosa de onda corta es convertida en energía calórica de onda larga, se conoce como **insolación**. El calor formado por la insolación puede ser almacenado en la superficie, o reirradiado de nuevo a la atmósfera. Parte de este calor reirradiado también puede ser nuevamente reflejado a la superficie.

Como resultado de estos procesos, la energía calórica es atrapada en la superficie terrestre, por lo cual la temperatura permanece relativamente alta si se compara con el frío extremo del espacio exterior. En general, este proceso de calentamiento es denominado efecto invernadero.

La temperatura en la superficie terrestre varía de

un lugar a otro, de la noche al día y del verano al invierno; sin embargo, el equilibrio general entre la energía calórica obtenida por la Tierra y su atmósfera, y la energía calórica perdida se mantendrá. Este balance entre el calentamiento y el enfriamiento es representado por la siguiente ecuación:

$$S(1-\alpha) + L_d - L_u \pm H_{\text{aire}} \pm H_{\text{evap}} \pm H_{\text{suelo}} = 0$$

Donde

S = ganancia solar,

α = albedo de la superficie de la Tierra (con un valor entre 0 y 1),

L_d = flujo de energía calórica de onda larga hacia

la superficie,

L_u = flujo de energía calórica de onda larga que se aleja de la superficie, y

H = ganancia o pérdida de energía calórica a partir del aire, suelo y agua (evap).

Actualmente este equilibrio puede estar sufriendo una variación en respuesta a los cambios inducidos por los humanos en la atmósfera. Estos cambios, incluyen un aumento en los niveles de dióxido de carbono a partir del consumo de combustibles fósiles. Conforme más dióxido de carbono y de otros gases con efecto invernadero son liberados a la atmósfera, más calor es atrapado entre ésta y la superficie. Actualmente se

TEMA ESPECIAL

Causas y Consecuencias del Calentamiento Global

El calentamiento global es un fenómeno relativamente reciente, producto de la era industrial. Nuestras plantas de energía, fábricas y automóviles liberan a la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono y de otros gases que atrapan la radiación solar en la atmósfera terrestre. Hasta ahora, el efecto acumulado de un siglo de intenso uso de combustibles fósiles es un ligero incremento en el promedio global de la temperatura de la superficie de los últimos cincuenta años. Debido a la vasta complejidad de la dinámica de la atmósfera, es difícil para los científicos predecir con seguridad que ocurrirá en el futuro, pero hay gran preocupación de la comunidad científica sobre las consecuencias de continuar liberando dióxido de carbono y otros gases con efecto invernadero a la atmósfera.

La cantidad de carbono en la atmósfera se ha incrementado en 30% desde el inicio de la era industrial. Este aumento se debe principalmente a la quema de combustibles fósiles en la industria manufacturera y la producción de energía y a la deforestación. Esta última es doblemente detrimental (perjudicial) porque la vegetación eliminada es usualmente quemada, liberando más carbono y también porque se pierden plantas que capturan dióxido de carbono.

Aunque las prácticas de la agricultura moderna aportan en forma directa solamente una pequeña parte de la liberación de los gases con efecto invernadero a la atmósfera, ellas son la causa indirecta de una liberación mayor. Por ejemplo, la eliminación de los bosques para propósitos agrícolas, incluyendo el pastoreo, es una causa importante de deforestación. Adicionalmente, los combustibles fósiles son quemados para producir la energía necesaria para la síntesis de los plaguicidas y fertilizantes, y el transporte de los productos agrícolas a todo el mundo requiere más consumo de combustibles fósiles.

En promedio, la Tierra es actualmente 0,5 °C más caliente de lo que era hace cincuenta años. Muchos científicos están preocupados porque la temperatura global probablemente continuará aumentando y los efectos pueden ser extremadamente serios. Estudios recientes sugieren que un clima más cálido causará efectos climáticos extremos a nivel local, tales como inundaciones y sequías. Los modelos atmosféricos indican que mientras algunas áreas podrán tener un aumento en la precipitación, otras regiones, incluyendo el sur y el sureste de Asia, América Latina y el África sub-Sahariana, probablemente sufrirán por aumento en el calor y lluvias destructivas. Otra preocupación es que mucha de la mejor tierra agrícola se encuentra en las regiones costeras bajas a lo largo del mundo y podrían ser inundadas si la temperatura global se incrementara lo suficiente para derretir, aunque sea en una pequeña proporción,

están realizando estudios para determinar el impacto de un aumento global de la temperatura sobre la agricultura, tanto los positivos como los negativos.

PATRONES DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA SOBRE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

Hay varios aspectos ecológicos relacionados con la distribución de la temperatura que son útiles para entender la variación y la dinámica de las condiciones de la misma en la superficie. Necesitamos conocer esta información, para realizar una selección apropiada de los cultivos, pero también para adaptar los agroecosistemas a las condiciones de temperatura y alterar estas condiciones cuando sea posible.

Las mayores variaciones de temperatura ocurren cuando se consideran los climas del mundo, formados por patrones estacionales de temperatura, lluvia, viento y humedad relativa.

En el otro extremo de la escala, también se dan fluctuaciones importantes a un nivel micro si se considera la temperatura bajo el dosel de un cultivo o la luz que se registra bajo la superficie del suelo.

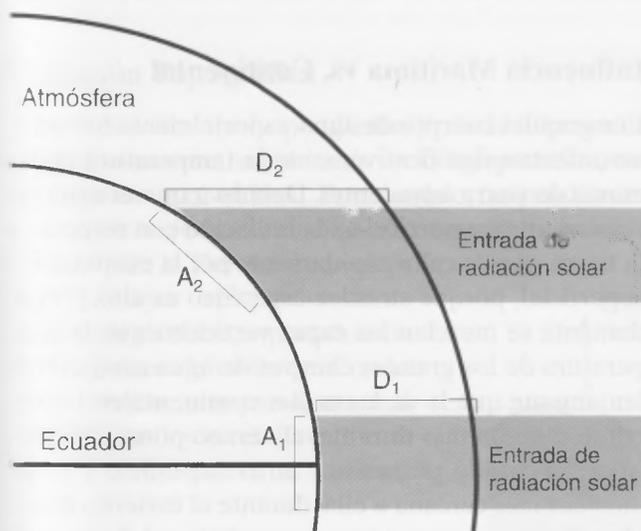


FIGURA 5.1

Efecto de la latitud sobre el aprovechamiento solar. A mayor latitud, aumenta la distancia que la radiación solar debe recorrer a través de la atmósfera ($D_2 > D_1$) y aumenta la superficie sobre la cual la radiación solar es dispersada ($A_2 > A_1$).

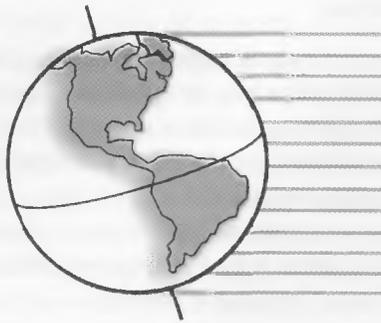
Variación Latitudinal

La latitud tiene un efecto significativo en la cantidad de radiación solar absorbida por la superficie en un período determinado de tiempo. En la zona del Ecuador, o cerca del mismo, la radiación llega a la superficie de la Tierra en ángulo vertical.

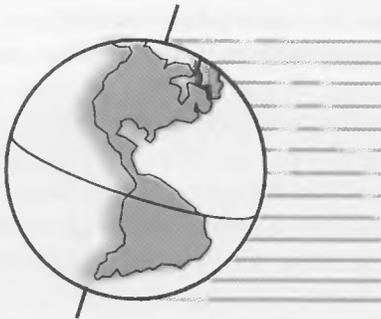
Sin embargo, al incrementarse las distancias desde el Ecuador, los rayos solares llegan a la superficie con un ángulo cada vez más estrecho. Conforme este ángulo se reduce, la misma cantidad de radiación solar que llega es dispersada sobre un área cada vez más grande de la superficie terrestre, como se muestra en la Figura 5.1. Además, los rayos solares deben pasar a través de un estrato atmosférico que se hace más grueso a mayor latitud, lo que provoca pérdida de energía debido al reflejo y dispersión que ocurre en la atmósfera, por ejemplo por las gotas de agua y polvo. El efecto global es una disminución regular de la intensidad de la radiación solar por unidad de superficie conforme uno se aleja del Ecuador. Esta variación latitudinal en el aprovechamiento de la energía solar es una de las principales causas de las variaciones de la temperatura.

Variación Altitudinal

A cualquier latitud, conforme se incrementa la altitud, la temperatura disminuye. En promedio, por cada 100 m de elevación, la temperatura ambiente disminuye aproximadamente 0,5 °C. En zonas donde el incremento de la cobertura de nubes durante el día está asociado con la altitud, el efecto de la disminución de la temperatura puede ser aún mayor debido a la reducción en el aprovechamiento de la radiación. Al mismo tiempo, la creciente disminución en el grosor de la atmósfera a mayor latitud, provoca más pérdida de calor, tanto de la superficie del suelo como del aire que se encuentra sobre ella por la reirradiación que ocurre durante la noche. Este fenómeno contribuye significativamente a la disminución de la temperatura nocturna particularmente a gran altitud. En las regiones montañosas altas en los trópicos (de más de 3 000 m) y a menor altitud conforme se mueve hacia los polos, la reirradiación nocturna es tan intensa que se presentan temperaturas muy frías en casi todas las noches cuando el cielo está claro.



Invierno en el Hemisferio Norte
Verano en el Hemisferio Sur



Verano en el Hemisferio Norte
Invierno en el Hemisferio Sur

FIGURA 5.2

Variación estacional en el ángulo de incidencia del sol. La inclinación hacia el sol que ocurre en el verano, incrementa tanto la longitud del día como la intensidad de la radiación solar que llega a la superficie.

Variación Estacional

Las diferencias estacionales en la temperatura de la superficie terrestre se deben al cambio en la orientación de la Tierra, en relación con el sol, conforme gira sobre su eje inclinado (Figura 5.2). A lo largo del año, una franja de máximo aprovechamiento de energía solar o de insolación se mueve de atrás hacia delante, cruzando el Ecuador en relación con el ángulo de incidencia de los rayos solares y de la longitud del día. En los días más largos el aprovechamiento de la energía solar es mayor. Esta oscilación de la insolación es la causa directa del cambio estacional de la temperatura. El grado de variación estacional en la temperatura promedio se incrementa conforme aumenta la distancia desde el Ecuador.



FIGURA 5.3

Producción de lechuga durante todo el año en un clima marítimo templado. El efecto del enfriamiento de la niebla en el verano y el calentamiento del océano en el invierno, permiten la producción de hortalizas y frutas durante todo el año en la costa central de California.

Influencia Marítima vs. Continental

Los grandes cuerpos de agua, especialmente los océanos, afectan significativamente la temperatura de las masas de tierra adyacentes. Debido a que el agua refleja mayor proporción de la radiación con respecto a la tierra, pierde calor rápidamente por la evaporación superficial, porque su calor específico es alto, y rápidamente se mezclan las capas verticalmente, la temperatura de los grandes cuerpos de agua cambia más lentamente que la de las masas continentales. La tierra se calienta más durante el verano porque todo el calor absorbido permanece en la superficie y la atmósfera más cercana a ella, durante el invierno mientras llega a temperaturas muy bajas debido a la reirradiación y pérdida de calor. Las masas de agua son, de esta forma, moderadoras de amplias fluctuaciones en la temperatura, tendiendo a disminuirla en el verano y a incrementarla en el invierno. Este efecto mediador del agua- o marino – sobre la temperatura es llamado **influencia marítima**, y contrasta con las variaciones más amplias de la fluctuación que

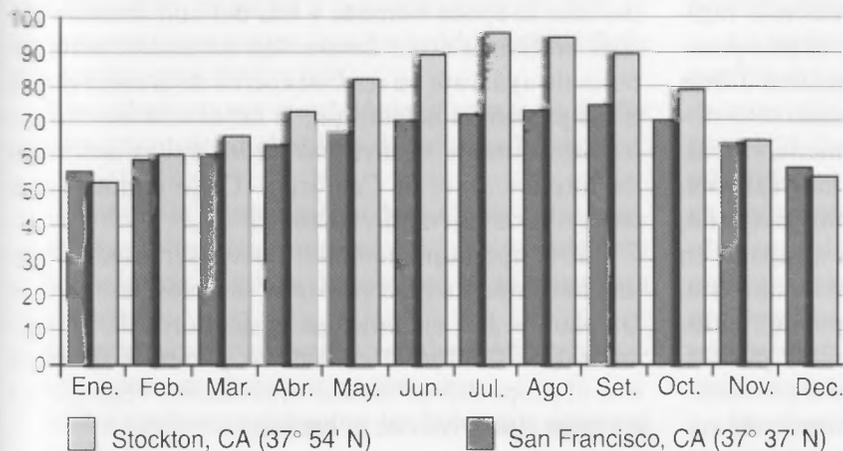


FIGURA 5.4
Promedio mensual de la temperatura máxima diaria en San Francisco, CA y Stockton, CA. Ambas ciudades están casi a la misma latitud y altitud, pero la costa de San Francisco tiene un clima con influencia marítimo, y Stockton, 100 km al este, tiene influencia continental. Fuente: Conway y Liston (1990).

ocurren en regiones alejadas de masas de agua y que están bajo **influencia continental**. La influencia marítima ayuda a crear los climas Mediterráneos únicos en lugares tales como las costas de California y Chile, donde las corrientes frías cercanas y ascendentes aumentan la influencia reguladora durante la época seca de verano.

Variación Topográfica

La orientación de la pendiente y de la topografía también ocasiona variaciones en la temperatura, especialmente a nivel local. Por ejemplo, las pendientes con orientación hacia el sol, como resultado de la inclinación de la Tierra sobre su eje, logran mayor aprovechamiento de la energía solar, especialmente en los meses de invierno. Consecuentemente, una pendiente con orientación hacia el Ecuador es significativamente más caliente

que una pendiente orientada hacia el polo- manteniendo todos los demás factores iguales- y ofrece microclimas únicos para el manejo de los cultivos.

Los valles rodeados por pendientes montañosas también crean microclimas únicos. En muchas partes del mundo, el aire que se mueve pendiente abajo debido al viento o por diferencias de presión puede expandirse rápidamente y calentarse conforme descende, este proceso se conoce como calentamiento catabático. (El viento asociado a este fenómeno será discutido en el Capítulo 7). Conforme se calienta el aire, aumenta su capacidad para retener la humedad en forma de vapor (humedad relativa), y se incrementándose la evaporación del aire más cálido.

FIGURA 5.5
Descenso de aire frío y capa de inversión. El aire frío puede descender a la parte baja del valle en la noche y hacer subir una capa de aire más caliente.



Los valles también están sujetos a variaciones microclimáticas nocturnas. En las pendientes de mayor elevación sobre el valle, la reirradiación es más rápida y debido a que el aire frío resultante es más pesado que el aire caliente de abajo, este empieza a fluir hacia abajo por la pendiente, este fenómeno se conoce como **drenaje de aire frío**. Frecuentemente, este aire más frío pasa por debajo del aire más caliente, empujándolo hacia arriba y formando una **inversión**, en la cual una capa de aire caliente es atrapada en forma de emparedado entre dos estratos de aire frío. En algunos lugares, la bolsa de aire frío puede conducir a la formación de heladas y dañar las plantas, mientras la inversión de aire cálido sobre él permanece mucho más caliente. La Figura 5.5 ilustra este patrón local de variación de la temperatura. El cultivo de cítricos sensibles a las heladas, ubicado entre los 150 y 300 m sobre el nivel del mar, en las pendientes más bajas de las Montañas de la Sierra Nevada, en el Valle Central de California, es un ejemplo de cómo los agricultores han aprendido a tomar ventaja de la inversión de los estratos de aire caliente que ocurre durante el invierno, y que es forzado a desplazarse hacia arriba por el drenaje del aire más frío hacia la parte baja del valle.

RESPUESTAS DE LAS PLANTAS A LA TEMPERATURA

Todos los procesos fisiológicos de las plantas – incluyendo la germinación, la floración, el crecimiento, la fotosíntesis y la respiración – tienen límites de tolerancia a las temperaturas extremas y un ámbito de temperatura relativamente estrecho, en el cual su funcionamiento es óptimo. De esta forma, el régimen de temperatura al cual la planta está expuesta finalmente está relacionado con su rendimiento potencial. Por ejemplo, las condiciones de temperatura pueden permitir que una planta se establezca y crezca, pero un cambio brusco del clima (ejemplo, un período frío) puede evitar que florezca y produzca semilla.

Los agricultores deben adaptar cuidadosamente sus prácticas al régimen local de temperatura, tomando en cuenta las variaciones diurnas, los cambios estacionales, las influencias reguladoras, el microclima y otros factores relacionados con la temperatura, así como las respuestas específicas a la temperatura de cada cultivo. En California, por ejemplo, los agricul-

tores utilizan cultivos de estación fría como el brócoli para las siembras de invierno, cultivos de cobertura durante la época húmeda y fría del año, cuando muchas hortalizas no se desarrollan adecuadamente, árboles de aguacate en regiones cerca de la costa donde no se presentan heladas por la influencia marítima, y lechuga durante el invierno en los valles desérticos del interior, al sur de California. Otras regiones agrícolas ofrecen ejemplos similares.

La temperatura también puede ser usada como una herramienta para provocar cambios deseados en las plantas. Por ejemplo, los agricultores de la costa central de California enfrían las plántulas de fresa, con el propósito de inducir crecimiento vegetativo y un buen desarrollo de la corona.

Adaptaciones a Temperaturas Extremas

Los ecosistemas naturales están formados por plantas y animales que han sido “tamizados” por una selección natural. Temperaturas extremas periódicas son uno de los factores que han eliminado aquellas especies que no son tolerantes a las condiciones locales. Por lo tanto, podemos esperar que la tolerancia de las especies a un ámbito de temperaturas en sistemas naturales locales, nos indican los valores extremos que podemos esperar cuando tratemos de cultivar en esa área. El reconocer estos indicadores, así como el seleccionar las especies a cultivar por su adaptación a estos extremos, es importante en el desarrollo de sistemas agrícolas porque reduce el riesgo asociado a la variabilidad natural de las temperaturas extremas.

Calor

Los efectos de las altas temperaturas sobre los cultivos son el resultado de una compleja interacción entre la pérdida de agua por evaporación, los cambios en el nivel interno del agua y la modificación en otros procesos fisiológicos. El estrés por calor causa una disminución en la actividad metabólica, la cual se considera que es consecuencia de la inactivación de enzimas y de otras proteínas. El calor también incrementa la tasa de respiración, la cual puede sobrepasar eventualmente la tasa de fotosíntesis, deteniendo el crecimiento de la planta y finalmente, matando el tejido.

Las plantas nativas de las áreas templadas, generalmente, tienen límites más bajos al estrés por tem-

peratura que las plantas de áreas más tropicales. Sin embargo, en todos los casos, las funciones de la hoja se encuentran inhibidas a aproximadamente 42°C, y las temperaturas letales para los tejidos activos de la hoja están entre 50°C y 60°C.

Las adaptaciones morfológicas comunes de las plantas para tolerar el exceso de calor incluyen:

- un punto de compensación del CO₂ alto para la relación fotosíntesis-respiración, frecuentemente lograda con la ayuda de cambios en la estructura de la hoja;
- hojas blancas o grises que reflejan la luz y consecuentemente absorben menos calor;
- vellos (pubescencia) sobre las hojas que aíslan el tejido foliar;
- hojas pequeñas con menos área superficial expuesta a la luz del sol;
- hojas con una menor relación superficie- volumen para un menor aprovechamiento del calor;
- orientación vertical de las hojas para reducir el aprovechamiento del calor;
- raíces más largas, o una mayor relación raíz-follaje, para absorber más agua y compensar la pérdida del fluido por las hojas o para mantener una mayor absorción de agua en relación con el área foliar;
- una corteza gruesa, corchosa o fibrosa que aisle al cambium y al floema en el tronco de la planta;
- menor contenido de humedad del protoplasma y mayor concentración osmótica en el tejido vivo.

Estas adaptaciones pueden ser incorporadas a los sistemas agrícolas donde la disponibilidad de agua es limitada y las temperaturas son altas, ya sea mediante el uso de cultivos que las posean, o el mejoramiento de variedades que los posean.

Frío

Cuando las temperaturas disminuyen y llegan a ser menores que el mínimo requerido para el crecimiento, una planta puede entrar en dormancia, aún cuando la actividad metabólica continúe lentamente. En consecuencia puede ocurrir clorosis, seguida, eventualmente, por la muerte del tejido. La muerte causada por baja temperatura se debe a la precipitación de las proteínas (lo cual puede ocurrir a temperatura sobre el punto de congelamiento), la salida de agua del

protoplasma cuando el agua intercelular se congela y la formación de cristales de hielo dentro del propio protoplasma.

La resistencia al frío extremo depende en gran medida del grado y duración de la baja temperatura, de cuan rápido se presenta la temperatura fría y al complejo de condiciones ambientales que la planta puede haber enfrentado antes del evento frío. Algunas adaptaciones estructurales específicas también ofrecen resistencia, tales como coberturas de cera o pubescencias que permiten a las hojas resistir fríos prolongados sin que se congele el tejido interior, o la presencia de células más pequeñas en las hojas que resisten el congelamiento.

En algunas plantas los daños temporales por frío pueden ser provocados por una exposición durante corto tiempo a temperaturas que están a unos pocos grados por encima del punto de congelamiento o reteniendo el agua por unos cuantos días. Estas plantas experimentan un **endurecimiento**, que les da una resistencia limitada al frío extremo cuando esto ocurre. Las plántulas que crecen en invernadero pueden ser endurecidas por el frío exponiéndolas a temperaturas más bajas bajo techo y retirándoles la irrigación unos días antes de trasplantarlas al campo.

Muchas plantas están adaptadas al frío extremo porque poseen mecanismos que les permiten evitarlo. Algunos ejemplos de plantas que evitan el frío son los arbustos desiguos perennes, o los árboles que pierden sus hojas y entran en dormancia durante el período frío, plantas de bulbos que pierden las hojas pero que mantienen vivas sus estructuras que están bajo tierra y las plantas anuales que completan su ciclo de vida y producen semillas.

Termoperíodo en las Plantas

Algunas plantas necesitan variaciones diarias en la temperatura para lograr un crecimiento o desarrollo óptimo. En un artículo clásico sobre ecofisiología (Went 1944), se demostró que las plantas de tomate que crecieron en condiciones de temperaturas diurnas y nocturnas iguales no se desarrollaron como aquellas plantas que crecieron con temperaturas diurnas normales y temperaturas nocturnas más bajas. Esta respuesta ocurre cuando la temperatura óptima para el crecimiento - la cual ocurre principalmente en la noche - es sustancialmente diferente a la temperatura

óptima para la fotosíntesis que se da durante el día.

En muchos ecosistemas naturales y agroecosistemas las plantas enfrentan variaciones diurnas en la temperatura que son registradas por las plantas en muchos casos a campo abierto, pero en agroecosistemas muy controlados, como los de invernadero, la variación diurna de la temperatura es mucho menor. En otras situaciones, las plantas de climas con noches frías no se desarrollan bien en regiones con temperaturas relativamente constantes durante el día y la noche, como es el caso de los trópicos húmedos o en las regiones templadas durante la época de verano.

Vernalización

Algunas plantas necesitan estar expuestas a un período de frío, llamado **vernalización**, antes de que ciertos procesos del desarrollo se lleven a cabo. Por ejemplo, en las praderas de California, muchas especies de hierbas nativas no germinan hasta después de un período frío de varios días, aún cuando la precipitación ya haya ocurrido. Debido a que la época de la prime-

ra lluvia de la estación en esta área es muy variable y a que la lluvia temprana es usualmente seguida por un período muy seco antes de que empiece una precipitación más consistente, si la germinación ocurriera con la lluvia inicial, la mayoría de las nuevas plántulas probablemente no sobrevivirían. De esta forma, hay una ventaja selectiva en retrasar la germinación hasta después de que ocurra la vernalización.

Muchas plantas agrícolas y hortícolas responden a la vernalización. Los bulbos de los lirios, por ejemplo, son tratados con frío antes de plantarlos, de tal forma que puedan estar floreciendo para pascuas en las áreas templadas del norte. En otros casos, las semillas de los cultivos son tratadas con frío antes de sembrarlas, con el propósito de asegurar una germinación más uniforme.

MICROCLIMA Y AGRICULTURA

Hasta ahora la temperatura ha sido discutida como un factor del clima. Este está constituido por patrones de las condiciones atmosféricas, que son razona-

CUADRO 5.1 Perfil microclimático esquemático de un sistema intercalado desarrollado de maíz/frijol/calabaza, mostrando niveles relativos de cinco factores en cada estrato del dosel al medio día

	Temperatura	Velocidad del viento	Vapor de agua	Luz	CO ₂
Arriba del dosel del maíz	■	■	□	■	■
Parte alta del dosel del maíz	■	■	■	■	□
Interior - medio	■	■	■	■	□
Bajo las hojas de la calabaza	■	■	■	□	■
Superficie del suelo	□	□	■	□	■

■ Nivel más alto

■ Nivel bajo

■ Nivel alto

□ Nivel más bajo

■ Nivel Medio

Adaptado por Montieth (1973).

blemente predecibles, pero altamente variables, los cuales ocurren durante un largo período en cierta área geográfica. La climatología, o el estudio de los patrones climáticos, estima la temperatura promedio en cualquier parte de la Tierra y el grado de variación que puede esperarse. Existe poca probabilidad de que en un futuro cercano, el hombre pueda realizar alguna modificación al clima a gran escala, especialmente en lo referente a la temperatura. Los aspectos climáticos a gran escala, tales como frentes fríos, tormentas de viento y patrones de lluvia, se enfrentan mejor seleccionando cultivos adaptados al ámbito de condiciones climáticas esperadas.

Pero a nivel de organismo, como un cultivo individual o una plantación, hay un aspecto del clima que puede ser manejado – el **microclima**. El microclima es la condición localizada de temperatura, humedad y atmósfera en el entorno inmediato de un organismo. De acuerdo con algunas definiciones, el microclima está formado por las condiciones que ocurren en una zona cuya altura es cuatro veces la del organismo considerado. Aunque el microclima incluye otros factores además de la temperatura, los agricultores probablemente están más interesados en ésta cuando modifican el microclima o aprovechan las variaciones microclimáticas.

Perfil Microclimático

Dentro de un sistema de cultivo, las condiciones de temperatura, humedad, luz, viento y calidad atmosférica varían con la localización específica. Las condiciones sobre el dosel del sistema de cultivo pueden ser muy diferentes de las registradas en el interior, en la superficie del suelo y bajo el suelo, en la zona radical. Las condiciones microclimáticas específicas a lo largo de un transecto vertical, dentro de un sistema de cultivo, forman lo que se conoce como el perfil microclimático del sistema. Tanto la estructura del sistema, como las actividades de los componentes, tienen impacto sobre el perfil microclimático. Este también cambia conforme se desarrollan las especies vegetales que lo componen.

El Cuadro 5.1 muestra un esquema del perfil microclimático de un sistema de cultivo intercalado de maíz, frijol y ayote, cada factor es medido en términos relativos para cada uno de los cinco estratos del dosel. En ese sistema, el perfil microclimático es muy di-

ferente en cada estado de desarrollo, desde la germinación hasta el desarrollo total.

El perfil microclimático subterráneo también es importante; este se extiende desde la superficie del suelo hasta una pequeña distancia por debajo de las raíces más profundas del cultivo. Bajo ciertas condiciones, el microclima del suelo y el atmosférico pueden ser tan diferentes que le causan problemas al mismo. Por ejemplo, las corrientes de vientos cálidos que se presentan cuando el suelo está muy frío pueden causar desecación de la parte aérea de la planta, debido a que las raíces no pueden absorber agua tan rápido como para contrarrestar la pérdida de la misma.

Modificación de la Temperatura del Microclima

Mediante el diseño y manejo apropiado, el microclima de un sistema puede ser modificado. Esta modificación es especialmente importante si el propósito del agricultor es crear o mantener condiciones microclimáticas que favorezcan la sostenibilidad del sistema de cultivo. Si este es el caso, cada modificación debe ser evaluada tanto por su contribución al incremento de la producción y de mercado a corto plazo, como por su aporte a la sostenibilidad del sistema a largo plazo.

Aunque el microclima incluye muchos factores, su modificación frecuentemente está enfocada específicamente en la temperatura. Las prácticas y técnicas que se emplean para modificar el microclima térmico se describen a continuación. Aún cuando la modificación de la temperatura es el principal propósito de estas prácticas, éstas también tendrán impacto sobre otros factores del microclima tales como la humedad y la luz.

Dosel

Los árboles y otras plantas altas que crean sombra sobre otras del sistema, pueden modificar sustancialmente las condiciones de temperatura bajo el dosel. La sombra que origina el dosel, reduce la cantidad de energía solar que llega a la superficie del suelo, además, ayuda a retener la humedad. Los sistemas agroforestales en los trópicos son un ejemplo de este tipo de práctica.

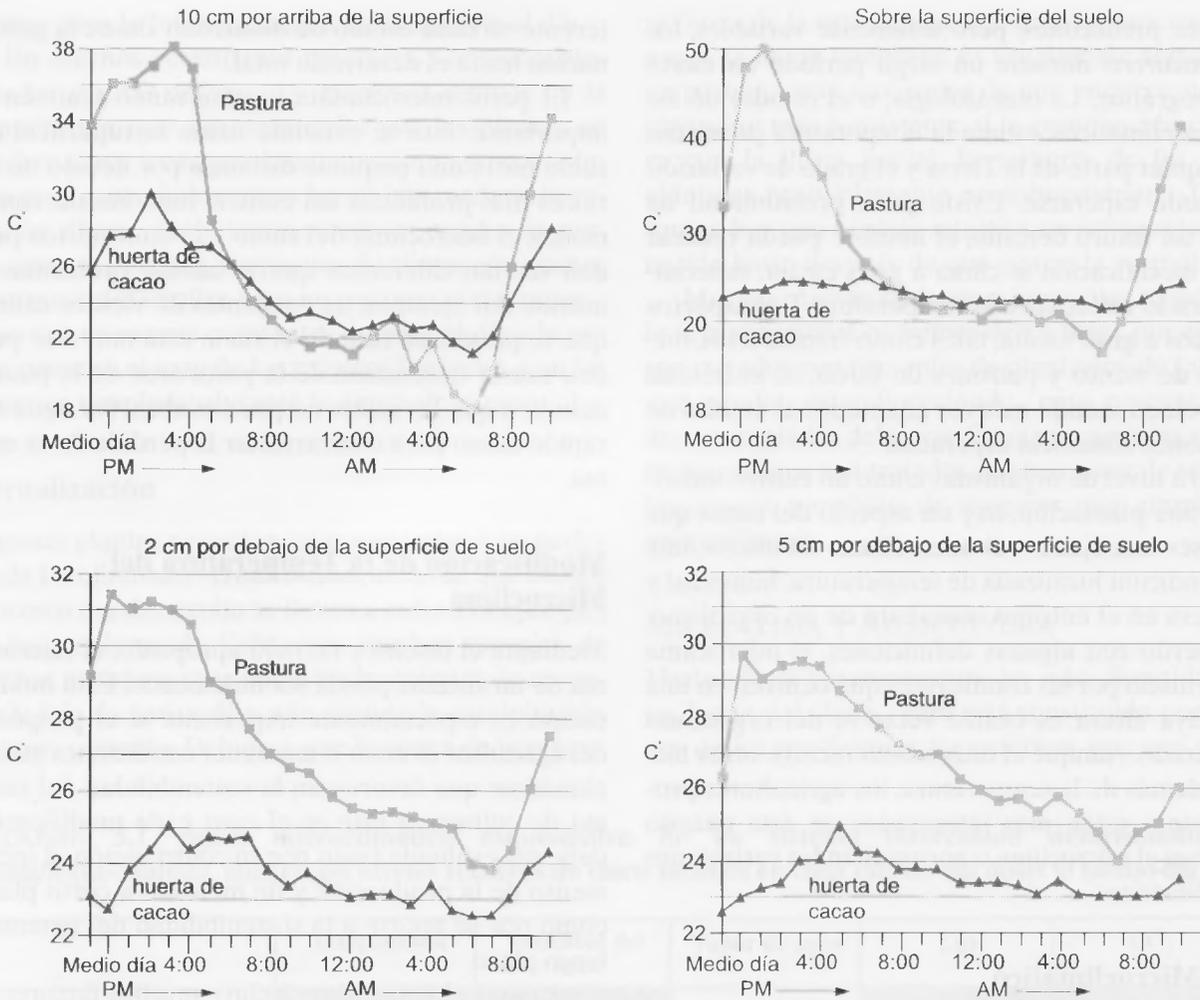


FIGURA 5.6

Cambios en la temperatura en un período de 24 horas, a cuatro diferentes niveles en un pastizal sin sombra y en un cultivo de cacao con sombra en Tabasco, México. La presencia de árboles en el sistema de cacao modera los cambios de temperatura a todos los niveles, conserva la temperatura bajo la superficie del suelo más baja que la del pasto sin sombra, y conserva la temperatura arriba del suelo más alta durante la noche. Un patrón similar se presenta con la humedad relativa: en el sistema de pasturas, la humedad fluctúa más en un período de 24 horas que en el sistema de cacao. Observe que las escalas sobre los ejes verticales no son todas idénticas. Fuente: Gliessman et al. (1978 c).

Los resultados de un estudio realizado en Tabasco, México (Gliessman 1978c) muestran claramente el efecto modificador de la temperatura que tienen los árboles. En ese estudio, el microclima térmico de un cultivo de cacao con sombra se comparó con el de una pastura vecina sin árboles. Como se muestra en la Figura 5.6, los cambios en la temperatura en un período de 24 horas, a varios niveles en la plantación de cacao, fueron mucho menores que aquellos observados

a los mismos niveles en la pastura. Este sistema fue más caliente durante el día que el sistema de cacao y más frío durante la noche en la parte aérea.

Doseles no Vivos

Existen otras formas para generar un dosel para un sistema de cultivo. Por ejemplo, las coberturas flotantes de surco fabricadas con fibra de nailon, se usan en

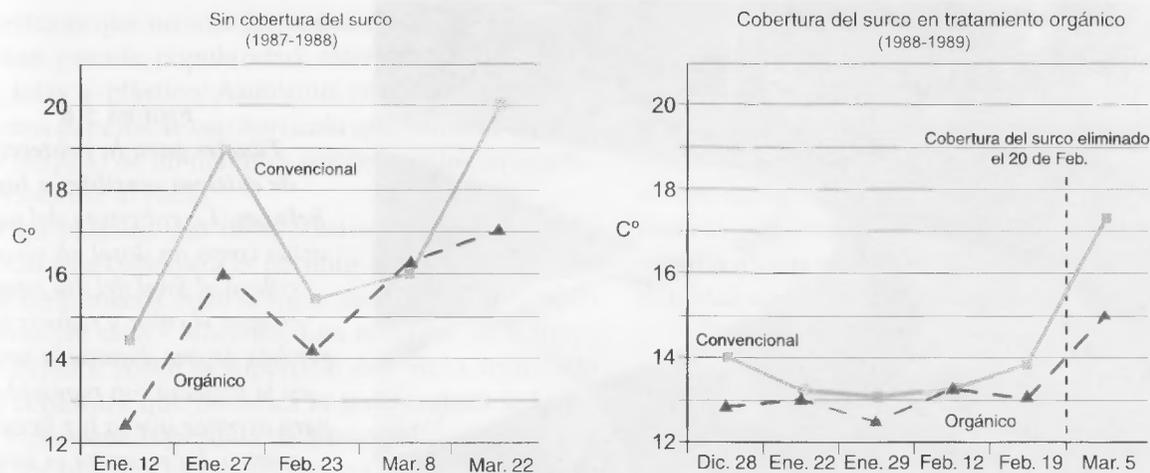


FIGURA 5.7

Efecto de las coberturas flotantes de surco sobre la temperatura del suelo en un cultivo orgánico de fresa. Cuando las fresas son cultivadas convencionalmente y debido a que las arvenses se eliminaron con herbicidas, es posible utilizar plástico transparente como coberturas para elevar la temperatura del suelo durante el invierno. En el cultivo de fresa manejado orgánicamente, debe usarse plástico negro en vez de los claros para prevenir el crecimiento de las arvenses. Sin embargo, el plástico negro es menos eficiente que el transparente para elevar la temperatura del suelo, tal y como se muestra en la gráfica del lado izquierdo. En un intento para compensar esta diferencia, se colocaron coberturas de surco flotante de nailon durante el último año de estudio. Como se observa en la gráfica derecha, las coberturas de surco disminuyeron la diferencia de la temperatura del suelo entre el tratamiento convencional y el orgánico durante el periodo que éstas permanecieron sobre las camas. Fuente: Gliessman et al. (1996).

el cultivo orgánico de fresa en California, durante la primera parte del invierno en un intento de permitir más radiación en la superficie del suelo y al mismo tiempo, proporcionar un efecto localizado de invernadero para el calor reirradiado por la misma superficie del suelo. La figura 5.7 muestra los resultados de una evaluación de esta práctica, en la cual la temperatura de los primeros 5 cm del suelo fue significativamente incrementada durante el período crítico del desarrollo de la raíz y de la corona de la planta de fresa (Gliessman et al. 1996).

También se han realizado muchas investigaciones y experiencias prácticas con el uso de "casas de arco" o túneles de plástico para la producción de hortalizas en California, en España y en otros lugares (Illic 1989). Los arcos de alambre o de plástico son colocados en el campo sobre las eras sembradas y posteriormente cubiertos con plástico o tela (Figura 5.8). El efecto local de invernadero de estas estructuras atrapa y retiene calor adicional durante el día, y la cobertura reduce la pérdida del mismo durante la noche. Los túneles de plástico pueden permitir la siembra de

cultivos de época caliente tales como tomate, chiles, o la extensión de la estación del cultivo hasta el otoño o principios de invierno cuando son posibles las heladas cortas. Debido a su costo elevado, estas estructuras están principalmente restringidas a cultivos con alto valor económico.

Coberturas del Suelo

Es posible inducir cambios en la temperatura del suelo cubriéndolo. La siembra de cultivos de cobertura es un método muy conocido para modificar la temperatura del suelo. El cultivo da sombra al suelo, disminuyendo por lo tanto, su temperatura, pero además proporciona otros beneficios como un incremento del contenido de materia orgánica del suelo, disminuye la germinación de las semillas de las arvenses y conserva la humedad. Cuando un cultivo de cobertura se siembra entre cultivos ya establecidos, frecuentemente se llama **cobertura viva**. Este tipo de cobertura puede cambiar el albedo de la superficie del suelo, haciéndolo menos reflectivo y aumentando



FIGURA 5.8
Túneles para la protección de cultivos sensibles a las heladas. La cobertura del túnel actúa como un dosel no vivo, se coloca al final del día para atrapar el calor y reducir la pérdida de éste durante la noche; en la mañana son removidos para permitir que la luz llegue al cultivo. La escarcha es aún visible sobre el terreno aledaño a la sombra del túnel del centro.



la temperatura del aire sobre el cultivo. Una cobertura viva también puede tener el efecto contrario sobre la temperatura, al incrementar la evaporación en la vegetación.

Las coberturas no vivas, ya sean de materiales orgánicos o inorgánicos, también pueden cambiar el microclima térmico; su efecto depende del color, textura y grosor del material. La paja de algunos cultivos tales como el trigo, avena y cebada son comúnmente usados como cobertura seca, al igual que muchas otras clases de residuos vegetales o zacates obtenidos de terrenos en descanso o barbecho, huertos, o áreas cercanas no cultivadas. Las plantas acuáticas como el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) o la hierba de pato (*Lemna* spp.), que son generalmente consideradas un problema en las corrientes de agua, especialmente en áreas tropicales, pueden ser sacadas del agua y usadas como cobertura. Las coberturas de especies vegetales eventualmente se incorporan al suelo, aumentando el contenido de la materia orgánica del mismo. Recientemente, algunos materiales para

FIGURA 5.9
Control preciso del microclima en un invernadero. La circulación de agua caliente en tubos bajo la bandeja de germinación, mantiene la temperatura del suelo caliente para las plántulas de hortalizas que se trasplantarán a principios de la estación.

coberturas que no son derivados de especies vegetales han ganado popularidad; estos incluyen periódicos, telas y plástico. Asimismo, se han desarrollado algunos papeles de uso hortícola que son biodegradables después de un tiempo y pueden ser incorporados nuevamente al suelo.

Una práctica que tiene efectos similares a los de colocar una cobertura es permitir la acumulación natural de la misma. Esto se logra mediante el uso de un sistema de cero - labranza. Los residuos de cultivos son dejados sobre la superficie del suelo, formando una cobertura que modifica la temperatura del mismo y previene la pérdida de humedad.

Una práctica es cambiar el color de la superficie del suelo para alterar su albedo y consecuentemente, la cantidad de energía solar que absorbe. La quema de residuos de cultivos es una forma de esto. Los residuos quemados y convertidos en carbón negro absorberán mayor cantidad de calor, mientras que los residuos quemados y transformados en cenizas blancas absorberán menos.

Invernaderos y Casas de Sombra

Las casas de sombra y los invernaderos son usados comúnmente para modificar la temperatura ambiental a nivel de microclima. Las casas de sombra bloquean una parte de la radiación solar entrante, disminuyendo el aprovechamiento de la energía solar y la temperatura.

Los invernaderos, por otra parte, son usados frecuentemente para conservar o atrapar el calor. Como se describió anteriormente, el conocido efecto de invernadero le permite a la energía ligera penetrar la cobertura de vidrio o de plástico de un invernadero, donde puede ser absorbida y reirradiada como energía calórica de onda larga. Esta energía reirradiada es entonces atrapada dentro del invernadero. Durante períodos prolongados de frío o de nubosidad, los productores pueden calentar el interior de sus invernaderos usando muchas fuentes diferentes. La circulación de agua caliente es usada frecuentemente para calentar los pisos de los invernaderos, o proveer calor sobre los bancos usados para la germinación o el desarrollo inicial de las plantas.

En ciertas épocas del año o en algunas zonas climáticas, el exceso de calor puede quedar atrapado en el invernadero, requiriéndose ventilación y aire frío. Otra forma de reducir la temperatura en los invernaderos es bloquear parte de la radiación solar entrante con sarán u otros materiales. Actualmente en el manejo sofisticado de los invernaderos se emplean computadoras y automatización para alcanzar niveles notables de control del microclima.

Métodos de Prevención del Daño por Heladas

En la mayoría de las regiones templadas del mundo, especialmente aquellas a gran altitud y latitud, los daños por heladas al principio o al final del ciclo de cultivo son un peligro constante. El empleo de coberturas y coberturas de los surcos son maneras de proporcionar alguna protección contra las heladas; pero también existen otros mecanismos.

Aumentar la temperatura del suelo mediante irrigación cuando se esperan heladas puede ayudar a incrementar la temperatura cerca del suelo debido a que la evaporación de la humedad transfiere calor del suelo al vapor del agua producido, el cual a su vez circula por la planta. El incremento en la humedad atmosférica, también proporciona protección a las plantas.

En las áreas localizadas en las partes bajas sujetas a que el aire frío baje durante la noche, los productores han utilizado durante mucho tiempo medios relativamente simples para aumentar la temperatura en los pocos grados que son necesarios para evitar el daño por heladas. Una técnica es el ahumado, en la cual algún tipo de combustible —como el diesel, basura, llantas viejas, o material vegetal— es quemado para generar humo que atrape el calor o para crear suficiente turbulencia de aire que evite que el aire frío se mantenga en las depresiones durante una noche de calma. Sin embargo, la preocupación por los daños en la salud y la contaminación del aire han reducido el uso de esta práctica, obligando a los agricultores a emplear grandes ventiladores para mantener el aire en movimiento en las áreas propensas a heladas. Obviamente, estas técnicas funcionan solamente bajo ciertas condiciones y sólo cuando es necesario aumentar la temperatura en pocos grados.

Temperatura y Sostenibilidad

La temperatura es un factor de considerable importancia agroecológica. Parte del entendimiento de este factor tiene que ver con el clima local y los patrones climáticos y de cómo los patrones a gran escala pueden afectarlos. La otra parte es aprender a controlar y modificar el microclima. Los agricultores durante mucho tiempo han empleado técnicas para lograr estas modificaciones, y el conocimiento científico moderno ha proporcionado muchas técnicas nuevas. Sin embargo, la agricultura aún enfrenta el reto de encontrar más y mejores maneras para diseñar agroecosistemas que por sí mismos modifiquen el microclima, en vez de basarse en insumos externos costosos y frecuentemente no renovables.

Ideas para Meditar

1. Describa ejemplos con los cuales los agricultores siembran cultivos en una región sujeta a temperaturas extremas mayores a los límites de tolerancia normal para esos cultivos específicos. ¿Cuál es la base ecológica para tener éxito en tales situaciones?
2. ¿Cuáles cultivos alimenticios consumes durante una época del año cuando la temperatura en tu región normalmente no permitiría el crecimiento de estos?
3. ¿Cómo puede el calentamiento global cambiar nuestros patrones de producción de alimentos y de consumo?
4. Aunque probablemente nunca seremos capaces de controlar las condiciones de temperatura a nivel climático, si podemos manejarla a nivel de microclima. ¿Cómo es posible modificar el microclima para

extender el ciclo de crecimiento para un cultivo? ¿Para permitir la siembra temprana en esa estación? ¿Para permitir la siembra a altitudes mayores? ¿Para proteger un cultivo de las temperaturas excesivamente altas?

Lecturas Recomendadas

Critchfield, H. 1974. *General Climatology*. Prentice-Hall, Inc.: New Jersey.

Uno de los textos estándares sobre patrones del clima, procesos, y dinámicas a una escala global.

Geiger, R. 1965, *The Climate Near the Ground*. Harvard University Press: Cambridge, MA.

La obra más completa en el campo de la micrometeorología, o el estudio del microclima en los 2 m sobre la superficie, en la cual viven la mayoría de los organismos.

Hellmers, H., and I. Warrington. 1982. Temperature and Plant Productivity. en Recheigl Jr., M. (ed.) *Handbook of Agricultural Productivity*. Vol. 1. CRC Press: Boca Raton, FL. pp. 11-21.

Una revisión de las complejas relaciones entre la temperatura, el crecimiento y el desarrollo de las plantas, enfocado principalmente a cultivos.

Walker, B., and W. Steffen. 1996. *Global Change and Terrestrial Ecosystems*. Cambridge University Press: New York.

Una colección de ensayos sobre el estado actual del conocimiento en la temática del cambio climático global y su impacto en los ecosistemas naturales y los intervenidos.

HUMEDAD Y PRECIPITACIÓN

La vegetación natural de un lugar es usualmente un indicador confiable de su régimen de precipitación. Los desiertos, con su vegetación escasa y de lento crecimiento, le dicen al observador que la precipitación anual local es mínima. Por otra parte, el crecimiento vegetativo exuberante de los bosques lluviosos tropicales y templados indica una abundante precipitación durante la mayor parte del año. La cantidad de lluvia y la vegetación tienen esta relación directa porque en la mayoría de los ecosistemas terrestres, el agua es el factor limitante más importante.

El agua es también un factor limitante primario en los agroecosistemas. La agricultura puede ser solamente practicada donde existe adecuada precipitación o donde es posible contrarrestar, mediante la irrigación, los límites impuestos por un clima seco.

En este capítulo discutiremos el significado agroecológico del agua en la atmósfera, tanto la humedad como la precipitación. Independientemente de este enfoque, el lector deberá tener en mente que el agua en la atmósfera es solamente un aspecto de un numeroso grupo de factores ambientales que afectan las plantas – aquellos que implican a la atmósfera como un todo. Los patrones de movimiento y cambio en la atmósfera, influyen no solamente los patrones de lluvia sino también los del viento y las variaciones en la temperatura. Combinados, los factores atmosféricos constituyen el clima cuando nos estamos refiriendo a las condiciones promedio anual, y el tiempo cuando nos estamos refiriendo a condiciones climáticas de corta duración.

VAPOR DE AGUA EN LA ATMÓSFERA

El agua puede existir en la atmósfera en forma gaseosa (como vapor de agua) o en forma líquida (como gotas). A una presión constante, la cantidad de agua

que el aire puede retener antes de que se sature y su vapor de agua se empieza a condensar y formar gotas, es dependiente de la temperatura. Conforme la temperatura del aire disminuye, la cantidad de agua que puede ser retenida en forma de vapor, también decrece. Debido a esta dependencia de la temperatura, la humedad – la cantidad de vapor de agua en el aire – es usualmente medida en términos relativos más que en cantidades absolutas. La **humedad relativa** es la relación entre contenido de vapor de agua del aire y la cantidad de vapor de agua que el aire puede retener a esa temperatura. Por ejemplo, a una humedad relativa de 50%, el aire está reteniendo el 50% del vapor de agua que podría retener a esa temperatura. Cuando la humedad relativa es 100%, el aire está saturado con vapor de agua. A un nivel de 100% de humedad relativa, el vapor de agua se condensa para formar llovizna, niebla y nubes.

La humedad relativa puede cambiar como resultado de variaciones en la cantidad absoluta de vapor de agua o de fluctuaciones en la temperatura. Si la cantidad absoluta de vapor de agua en el aire es alta, pequeñas variaciones en la temperatura pueden influir significativamente en la humedad relativa. Por ejemplo, una reducción de pocos grados de la temperatura en horas de la noche o de la mañana, puede llevar la humedad relativa al 100%. Una vez que ésta alcanza este valor, el vapor de agua se empieza a condensar como gotas de agua y a caer como rocío. La temperatura a la cual ocurre esta condensación se llama **punto de rocío**.

En los sistemas naturales, la interacción de la temperatura y del contenido de la humedad del aire puede ser un factor muy importante para determinar la estructura de un ecosistema. La comunidad de bosques de madera roja a lo largo de la costa de California es un ejemplo. Las corrientes frías del océano condensan el aire cargado de humedad que se en-

cuentra sobre el mismo, dando lugar a la formación de neblina. La presencia de neblina casi todas las noches durante los meses secos del verano, compensa la falta de precipitación y se considera la principal razón de que los bosques de maderas rojas aún existan en ese lugar. Algunos estudios estiman que la neblina y el rocío añaden por lo menos un 10% a la precipitación total efectiva de las regiones donde existen los bosques de madera roja.

Por razones similares, la humedad puede afectar los agroecosistemas. Por ejemplo, los cultivos plantados en las regiones con bosque de madera roja pueden beneficiarse de la humedad adicional que la neblina y el rocío les proporcionan; como resultado de esta situación, los productores de cultivos tales como la col de bruselas, la lechuga y la alcachofa usan menos agua.

PRECIPITACIÓN

Aunque el rocío y la neblina pueden contribuir con cantidades significativas de humedad en algunas regiones, la fuente primaria (natural) de agua para los agroecosistemas es la precipitación, usualmente en forma de lluvia o nieve. La precipitación proporciona directamente humedad al suelo y en agroecosistemas con riego, lo hace indirectamente al ser la fuente fundamental de la mayor parte del agua de riego.

El Ciclo Hidrológico

La precipitación es parte del ciclo hidrológico, el cual es un proceso global de movimiento de agua de la superficie de la Tierra hacia la atmósfera y de nuevo hacia la Tierra. En la Figura 6.1 se presenta un diagrama del ciclo hidrológico. El núcleo de este ciclo está constituido por dos procesos físicos básicos: la evaporación y la condensación. La evaporación ocurre en la superficie de la Tierra, conforme el agua se evapora del suelo, de los cuerpos de agua y de otras superficies húmedas. La evaporación del agua de la

estructura interna de las plantas también ocurre sobre la superficie de las hojas. Este tipo de evaporación, llamado transpiración, es parte del mecanismo por el cual las plantas absorben agua del suelo con sus raíces (ver Capítulo 3). La evaporación a partir de todas estas fuentes es llamada **evapotranspiración**.

Cuando la cantidad absoluta de vapor de agua en el aire es suficiente para alcanzar o exceder el 100% de la humedad relativa, la condensación se presenta. Se forman pequeñas gotas de agua que se unen para formar las nubes. La precipitación ocurre cuando las gotas de agua en las nubes se hacen lo suficientemente pesadas para caer. Esto usualmente ocurre cuando el aire que contiene la humedad se eleva (cuando es forzado hacia la parte alta de una montaña por el viento o se eleva sobre las corrientes de aire caliente) y empieza a enfriarse. Conforme el aire se enfría, su capacidad para retener la humedad en forma de vapor o como gotas muy pequeñas empieza a disminuir, ocasionando más condensación y agregación de las gotas. Este proceso de enfriamiento y condensación es llamado enfriamiento adiabático. La precipitación formada por enfriamiento adiabático cae a la tierra, entra a las cuencas o al océano y eventualmente retorna a la atmósfera.

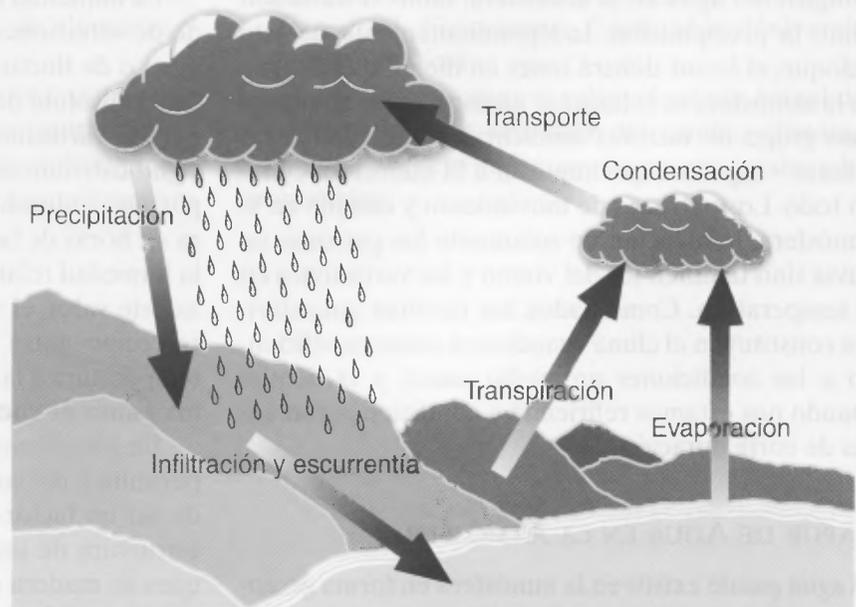


FIGURA 6.1
El ciclo hidrológico.

Tipos de Lluvia

La precipitación que es parte del ciclo hidrológico es muy variable. Las masas de aire cargadas de humedad se mueven constantemente sobre la superficie de la Tierra por los complejos movimientos de la atmósfera. La lluvia (y otras formas de precipitación) ocurren localmente en diferentes formas, dependiendo de la latitud, época del año, temperatura, topografía y del movimiento de las masas de aire. Sin embargo, en general la lluvia puede ser clasificada en tres tipos según los mecanismos que producen el enfriamiento adiabático de las masas de aire húmedo.

Lluvia Convectiva

La lluvia convectiva ocurre cuando altos niveles de energía solar calientan el aire cercano a la superficie, causando que suba rápidamente, se enfríe y condense la humedad que contiene. Frecuentemente, el aire que se eleva viene cargado de humedad de alguna fuente distante, como puede ser un lago, golfo, u océano. La lluvia asociada con nubes de verano y truenos es un ejemplo de la lluvia convectiva. Vientos fuertes y aún tornados, pueden acompañar estas tormentas, así como también lo pueden hacer relámpagos e incendios localizados. En muchas regiones, tales como el medio oeste Americano, los agroecosistemas son dependientes de este tipo de lluvia, al menos en ciertas épocas del año. La agricultura tradicional Hopi, en el suroeste de los Estados Unidos, es completamente dependiente de la lluvia convectiva, los torrentes que frecuentemente acompañan a estas tormentas son canalizados hacia abajo de las montañas y posteriormente dispersados sobre los campos cultivados en la boca de los cañones.

Lluvia Orográfica

La lluvia orográfica ocurre cuando una masa de aire cargada de humedad encuentra una cadena montañosa que la fuerza a subir a los niveles más fríos de la atmósfera. Tal precipitación ocurre sobre los flancos occidentales de la Si-

erra Nevada de California—como lluvia al pie de las montañas y como nieve a mayor altitud. Este tipo de precipitación es un importante reabastecedor de las corrientes y de los acuíferos, que más tarde se convierten en fuentes de agua para riego, río abajo, en las localidades más secas. La agricultura en una región como el Gran Valle Central de California no sería posible sin la precipitación orográfica en las montañas cercanas.

Lluvia Ciclónica

Este tipo de lluvia está asociada con áreas de baja presión atmosférica que se forman sobre el océano. El aire cargado de humedad se calienta y se eleva, creando un área de baja presión. Conforme este aire asciende, se enfría, forma la precipitación y entonces cae de nuevo sobre la superficie del océano donde puede obtener más humedad. Además, las corrientes de aire de este sistema que se autoperpetúa empiezan a girar en sentido contrario a las manecillas del reloj, alrededor del área de baja presión y el sistema completo empieza a moverse. Las corrientes de aire que giran forman las tormentas ciclónicas caracterís-



FIGURA 6.2
Sistema ciclónico de tormenta sobre el este del Océano Pacífico.

CUADRO 6.1 Precipitación total mensual y estacional (mm) en Swanton, Condado de Santa Cruz, California, Estados Unidos

Estación	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Total
1990-91	12,5	12,5	63,8	15,0	98,75	290,0	22,5	5,0	520,0
1991-92	38,8	32,5	127,5	72,0	280,0	60,0	7,5	0,0	618,2
1992-93	50,0	8,8	165,0	287,5	320,0	85,0	41,2	6,25	963,8
1993-94	12,5	77,5	77,5	87,5	180,8	25,0	63,8	55,0	574,5
1994-95	10,0	156,2	122,5	423,8	17,5	221,2	142,5	80,0*	1173,8
1995-96	0,0	7,5	231,2	183,8	250,0	80,0	25,0	86,5	864,0
Promedios	20,6	49,2	131,2	178,2	191,2	126,9	50,4	38,8	857,0

* Incluye 37,5 mm de junio.

Notas: La precipitación de junio a setiembre es mínima, excepto por la neblina de verano no medida que es característica de esta región. La precipitación promedio anual para esta localidad es de aproximadamente 900 mm.

ticas y los sistemas frontales que podemos ver en los mapas de clima. Cuando uno de estos sistemas ciclónicos se mueve hacia la costa, las masas de aire cargadas de humedad pueden ser forzadas hacia arriba contra las zonas montañosas, creando lluvia orográfica y ciclónica.

Descripción de los Patrones de Lluvia

Cada región de la Tierra tiene patrones característicos de precipitación. La cantidad total de precipitación en un año típico, su distribución a lo largo de este, la intensidad y duración de los eventos y la regularidad y predecibilidad de los patrones de precipitación, son importantes determinantes de las oportunidades y limitantes para la agricultura en una región en particular. A continuación, se describen estas facetas de los patrones de lluvia usando información recolectada por el autor en Swanton, California. Estos datos se muestran en el Cuadro 6.1.

- **Precipitación total anual promedio.** La cantidad total de precipitación que cae en un área durante un año promedio es un buen indicador de la humedad del clima de esa área. Sin embargo, desde una perspectiva ecológica es también importante conocer la variabilidad que puede haber en la precipitación entre un año y el siguiente. Los extremos en cualquier lado del promedio, tienen un impacto negativo importante sobre los sistemas agrícolas, aún si ese extremo ocurre rara vez. El Cuadro 6.1 muestra que en Swanton el total anual

de lluvia es altamente variable: durante el período de recolección de datos hubo tres años de sequía, dos años con precipitación cercana a la normal y un año excesivamente húmedo.

- **Distribución y periodicidad.** Esto se refiere a la distribución de la precipitación durante el año, y si existe algún punto máximo en el que la precipitación ocurre. El aspecto más distintivo de la distribución de la lluvia en Swanton, es que la precipitación está principalmente confinada al período entre octubre y mayo. Sin embargo, dentro de esa estación "húmeda", parece no haber un patrón regular de la distribución de un año a otro: si estos datos fueran graficados, los incrementos y los descensos para cada año no corresponderían. Por otra parte, los promedios mensuales muestran un punto máximo en la distribución de la lluvia entre enero y marzo.
- **Intensidad y duración.** La cantidad absoluta de lluvia en un período prolongado de tiempo, en un mes o aún en un día, no describe completamente la relevancia ecológica de la misma. Es importante conocer la intensidad de la lluvia y su duración. Cincuenta milímetros de lluvia en menos de una hora pueden tener impactos ecológicos muy diferentes que los mismos 50 mm distribuidos en 24 horas.
- **Disponibilidad.** También es importante conocer qué tanto de la precipitación está luego disponible como humedad del suelo. ¿Penetra dentro de la zona radicular? ¿Cuáles fueron las condiciones ambientales después del evento de precipitación?

TEMA ESPECIAL

Precipitación Ácida

La lluvia es la sangre de la vida tanto para los ecosistemas naturales como para la mayoría de los agroecosistemas. Sin embargo, en muchas áreas del mundo la lluvia está envenenando los sistemas que mantiene. La lluvia (y la nieve) que cae en estas áreas es lo suficientemente ácida para dañar los cultivos y los bosques, matar los peces y otros organismos acuáticos y acidificar el suelo.

La precipitación ácida es solamente una de las muchas consecuencias de la contaminación de la atmósfera causada por el hombre. La quema de combustibles fósiles en automóviles y plantas de energía, libera grandes cantidades de óxido de nitrógeno y óxido de azufre a la atmósfera cerca de las áreas urbanas e industriales. Estos compuestos, llamados precursores ácidos, se combinan fácilmente con el agua atmosférica para formar ácido nítrico y ácido sulfúrico. Estos ácidos son posteriormente disueltos en las gotas de agua de la atmósfera. Después de moverse a la deriva, eventualmente las gotas caen como precipitación ácida. (Los óxidos de nitrógeno y azufre también pueden formar nitratos y sulfatos en la atmósfera y "llover" como partículas sólidas. Cuando ellos se combinan con el agua, estas partículas son convertidas en ácidos y tienen el mismo efecto que la lluvia ácida.)

La lluvia en un ambiente no contaminado es ligeramente ácida de manera natural – mientras que el agua pura tiene un pH neutro de 7,0, el pH de una precipitación natural es alrededor de 5,7. Esta acidez normal es el resultado del dióxido de carbono atmosférico disuelto en las gotas de agua de las nubes, el cual forma ácido carbónico débil. Así, la precipitación ácida es un problema solamente donde los precursores ácidos producidos por la actividad humana bajan el pH de la precipitación a menos de 5,7. El lugar donde esto ocurrirá, depen-

de de la lluvia y patrones del viento, así como de la localización de las fuentes antropogénicas importantes de precursores ácidos. Por ejemplo, los patrones de viento prevalecientes, tienden a acarrear los precursores ácidos de las áreas urbanas y plantas de energía en el noreste de los Estados Unidos, a las Montañas Adirondack del Estado de Nueva York. Ahí, la precipitación tiene un pH promedio de aproximadamente 4,1. Otras áreas donde la precipitación ácida es un problema incluyen el norte de Europa, la mayor parte del este de los Estados Unidos, sureste de Canadá y partes del sur de California. Sin embargo, la distribución de la lluvia ácida, es extremadamente variable y puede ocurrir en casi cualquier área.

Se ha mostrado que la precipitación ácida tiene muchos efectos perjudiciales. Los ecosistemas acuáticos son particularmente vulnerables; los años de precipitación ácida han afectado muchos de los lagos en las áreas montañosas del este de los Estados Unidos y Canadá y los han dejado virtualmente sin vida. La lluvia ácida también daña los bosques: afecta las pínulas y las hojas, impide la germinación de las semillas y erosiona las ceras protectoras de las hojas.

El daño que la precipitación ácida causa a los ecosistemas es difícil de determinar. Algunos estudios han mostrado disminución en la productividad de los cultivos e inhibición de las reacciones oscuras de la fotosíntesis. Otros estudios han documentado daños a las hojas y yemas, así como la lixiviación del calcio de las hojas. En suelos con poca capacidad amortiguadora, la precipitación ácida ha causado acidificación del mismo y cambios en la disponibilidad de los nutrimentos. Aún cuando la distribución de la precipitación ácida varía, y que los diferentes cultivos y suelos tienen distintos niveles de sensibilidad, ésta representa un problema global con potencial para causar efectos significativos directos e indirectos sobre la agricultura.

¿Cuál fue la temperatura y cuáles fueron las condiciones del viento?

- **Predecibilidad.** Cada región tiene un grado característico de variabilidad en su patrón de precipitación. A mayor variabilidad, es menor la predecibilidad de la lluvia para cualquier época. Por ejemplo, los datos de lluvia presentados en el Cuadro 6.1 muestran que en Swanton, ésta tiene una variabilidad relativamente alta. Basado en estos datos, un agricultor no podría estimar que hubiese cuando menos 50 mm de lluvia en abril, aún cuando el promedio de seis años para ese mes es de 50,4 mm.

Desde una perspectiva agroecológica algunos aspectos adicionales de la lluvia también pueden ser relevantes. Por ejemplo, puede ser importante conocer qué tanta humedad había en el suelo cuando llovió, así como cuál era el estado de desarrollo del cultivo. Durante la cosecha de uva para vino de 1994, en las regiones del Paso Robles y Santa María en California, ocurrieron tres tormentas con una precipitación superior a los 75 mm entre finales de setiembre y principios de octubre. Debido a que las uvas aún estaban en la vid en esta época, las lluvias dañaron severamente el cultivo (en la mayoría de los años no ocurre una lluvia significativa hasta principios de noviembre, después de que las uvas han sido cosechadas).

AGROECOSISTEMAS DE TEMPORAL

La agricultura en la mayor parte del mundo utiliza la precipitación natural para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. Estos **agroecosistemas de temporal** deben ajustarse a la distribución, intensidad y variabilidad de la lluvia que es característica del clima local. El reto es mantener un balance entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP) manipulando la evapotranspiración, o manejar de alguna manera el déficit de agua ($P-ETP < 0$) o el sobrante de la misma ($P-ETP > 0$).

A continuación se presentan algunos ejemplos de cómo los agroecosistemas funcionan dentro de las limitantes de los regímenes de lluvia local, mostrándonos otra forma de examinar los aspectos de la sostenibilidad inherente a los enfoques agrícolas que trabajan con las condiciones ecológicas en lugar de buscar su alteración o control. Estos ejemplos fueron

seleccionados para ilustrar tanto el rango que va de una agricultura de temporal muy húmeda a una muy seca. Los aspectos del manejo de la humedad, una vez que ésta llega al suelo, se describen con más detalle en el Capítulo 9.

Agroecosistemas Adaptados a una Estación Lluviosa Prolongada

En regiones muy húmedas con precipitación abundante, los agricultores están más preocupados por los excesos de humedad que por la falta de la misma. Las lluvias frecuentes y abundantes causan problemas de inundación, enfermedades de las raíces, lavado de nutrientes, crecimiento abundante de arvenses y dificultades en la mayor parte de las labores agrícolas. Aún cultivos adaptados a tierras húmedas, tales como el arroz o la malanga son difíciles de manejar en regiones con una estación lluviosa prolongada. Los enfoques convencionales de manejo de los excesos de precipitación, la mayoría de las veces buscan alguna modificación mayor del hábitat, como es el caso de los proyectos de drenaje y control de inundación. En contraste, un enfoque agroecológico de manejo de una estación húmeda prolongada, busca las formas de adaptar el sistema al exceso de la humedad.

En Tabasco, México hacen uso interesante y productivo de los terrenos que permanecen inundados durante toda la época lluviosa (Gliessman 1992a). Esta región recibe más de 3000 mm de lluvia distribuida en una estación húmeda prolongada que va de mayo hasta febrero del siguiente año. El cultivo básico local, que es el maíz, es plantado en las partes más altas, alrededor de las tierras inundadas superficialmente durante la mayor parte del año. En marzo, sin embargo, la disminución de la precipitación permite la siembra de otro cultivo de maíz. Las áreas de las partes bajas se secan lo suficiente para que la superficie del suelo permanezca expuesta. Los agricultores siguen la línea del agua que va en retroceso con esta siembra especial de maíz, conocida localmente como plantación de marzo o *marceño*.

Durante la mayor parte del año, la lluvia constante mantiene las áreas bajas inundadas a una profundidad que varía desde unos cuantos centímetros a más de un metro. La vegetación de pantano que cubre densamente estas áreas durante la estación hú-



FIGURA 6.3

Variedad local de maíz, llamada mején, próxima a la madurez, 10 semanas después de la siembra en Cárdenas, Tabasco, México. Este sitio es un humedal durante ocho o nueve meses del año.

meda es cortada rápidamente con cuchillo a medida que el nivel del agua baja. Un colchón de materia orgánica muy denso de 10 a 20 cm es producido por este proceso. La semilla es plantada dentro de hoyos hechos con una vara puntiaguda que penetra el colchón. Aproximadamente una semana después de la siembra, se quema parte del colchón orgánico y se elimina cualquier arvense o rebrotes de las plantas del pantano. La quema debe ser regulada, de tal forma, que solamente queme las hojas secas de la parte superior del colchón y no sus estratos húmedos más bajos o el suelo mineral. La semilla de maíz, que es plantada 10-15 cm abajo de la superficie del suelo no es afectada por el fuego. Las variedades locales de maíz de ciclo corto son utilizadas con mayor frecuencia. La práctica de emplear semilla de la cosecha an-

terior para las siguientes siembras favorece el uso de variedades locales, evitando la compra de híbridos o semilla "mejorada" producida en localidades distantes. El nombre de una variedad de maíz—*mején*, proviene del maya que significa "precoz" o "de maduración temprana"—muestra la relación que este sistema puede tener con el pasado.

El maíz crece muy rápido en este sistema, y cuando el fuego no es usado en exceso y se permite que la inundación ocurra cada año, usualmente no es necesario el control de las arvenses. Después de aproximadamente dos meses y medio de crecimiento, las mazorcas maduras de maíz son "dobladitas" inmediatamente abajo de la base de la misma, facilitando el secado final del grano por otras dos a cuatro semanas antes de la cosecha. Son comunes rendimientos de 4-5 toneladas de grano seco/ha son, registrándose algunas producciones que alcanzan las 10 toneladas/ha. El rendimiento promedio de la producción mecanizada de las tierras, en que se ha eliminado las arvenses y drenados los terrenos en la misma región, es de 1-1,5 toneladas/ha. Los mayores rendimientos con el sistema utilizado por los agricultores se obtienen con una fracción del costo de los insumos y recursos que se invierte en los sistemas de producción mecanizada (Amador 1980). Después de la cosecha, todos los residuos del cultivo y de otras especies quedan en la superficie del suelo. Esto contribuye con un aspecto clave en la productividad del sistema con el mantenimiento de la materia orgánica en el suelo. Los perfiles de suelo demuestran la presencia de un estrato grueso, rico en materia orgánica a una profundidad de 30-40 cm debajo de la superficie. Durante los nueve meses de inundación, la materia orgánica producida por las plantas del pantano o dejadas por los ciclos de cultivos previos, es incorporada al suelo y conservada en condiciones anóxicas bajo el agua.

Además, los nutrientes minerales que entran al sistema por el drenaje superficial son capturados por la vegetación acuática del ecosistema que es muy productiva. Estos factores dan como resultado la formación de un suelo con una cantidad de materia orgánica superior al 30%, valores de nitrógeno total hasta de 3% y valores altos de otros importantes nutrientes. El elemento fundamental en el manejo de este sistema, es por lo tanto, la forma de cómo se toma ventaja de la inundación durante la estación húmeda. Cuando



FIGURA 6.4

Camellón (campo elevado) cerca de Ixtauixtla, Tlaxcala, México. El terreno es plantado con franjas rotacionales de alfalfa y maíz y frijol intercalados; los árboles de álamo indican el borde de los canales cavados para elevar el campo. El compost, en la parte frontal es usado como fertilizante.

el sistema es drenado artificialmente en un intento de extender el período de siembra, el estrato orgánico del suelo se reduce a 5 cm en menos de dos años y la producción disminuye dramáticamente.

Agroecosistemas Adaptados a la Alternancia de Estaciones Húmedas y Secas en los Trópicos

Muchas regiones del mundo tienen un clima de monzón, en el cual el promedio de precipitación anual es relativamente alto, pero casi toda la lluvia se presenta durante una estación húmeda de mediana duración. Los agricultores de estas áreas tienen que enfrentar excesos de lluvia en un tiempo y falta de la misma en otro.

Un agroecosistema muy interesante y productivo en un régimen de alternancia de lluvia fue observado en el Estado de Tlaxcala, México (González 1986; Anaya *et al.* 1987; Crews y Gliessman 1991; Wilken 1969). En un área conocida como la Cuenca de Puebla, localizada en la parte sur del estado, donde se encuentran los ríos Atoyac y Zahuapan, forma una

planicie de inundación triangular de aproximadamente 290 km². La precipitación promedio anual es aproximadamente de 700 mm. Gran parte de la planicie de la cuenca tiene un manto freático menor a 1 m durante la mayor parte del año, con suelos pobremente drenados y pantanosos. Para hacer estas tierras productivas, la mayoría de nuestros agrónomos actuales probablemente recomendarían drenar la región, de tal forma que se pudieran introducir prácticas mecanizadas para cultivar a gran escala. Pero los sistemas locales y tradicionales de cultivo, proporcionan una alternativa que hace uso del alto nivel freático y de la distribución de la lluvia en la cuenca.

Empleando un sistema de origen prehispánico, se han construido plataformas elevadas (localmente llamadas *camellones*), a partir de suelo excavado en sus bordes, creando un sistema de plataformas y canales (llamados *zanjas*). Las plataformas individuales son de 15–30 m de ancho, de 2–3 m de alto y de 150–300 m de largo. Sobre las plataformas se siembra una mezcla diversa de cultivos, que incluyen maíz, frijol y calabaza intercalados, hortalizas, alfalfa y otros cultivos anuales. La rotación de cultivos con leguminosas tales como la alfalfa o el frijol haba ayudan a mantener la fertilidad del suelo, y la mezcla de cultivos facilita el control de arvenses. La fertilidad del suelo también se mantiene por las frecuentes aplicaciones de compost preparado con estiércol de animales y residuos de cultivos. Gran parte de la alimentación de los animales viene de la alfalfa sembrada sobre las plataformas, o de los residuos de otros cultivos que no pueden ser consumidos directamente por los humanos (ejemplo, rastrojo de maíz). Una fuente suplementaria de alimento para los animales, se deriva de la vegetación no cultivada (ejemplo, arvenses) que es removida selectivamente del área de cultivo, o de las cosechas periódicas que se hacen de las ruderales y

plantas nativas que crecen, ya sea a lo largo de los canales o directamente en ellos como especies acuáticas. Esta última fuente de alimentación, puede constituir un componente muy significativo para la dieta del ganado durante la época seca.

El manejo de la compleja red de canales representa un aspecto muy importante de este agroecosistema tradicional. Los canales además de servir como fuente de suelo para elevar las superficies de las plataformas, también representan el principal reservorio de agua durante la estación seca. La materia orgánica se acumula en los canales conforme las plantas acuáticas mueren, las hojas de los árboles que crecen en los bordes del canal caen dentro del agua, y las arvenses provenientes de los campos de cultivo son arrojadas dentro de los canales. El suelo de las colinas vecinas y de las plataformas, también es lavado hacia los canales por las fuertes lluvias de la estación húmeda. Cada dos o tres años los canales son limpiados, sacando el suelo y la materia orgánica acumulada, material que se aplica a las plataformas como una cubierta superficial rica en nutrimentos.

De esta forma, los canales juegan un papel muy importante en la sostenibilidad de este agroecosistema. Ellos funcionan como "acumuladores" de nutrimentos para el agricultor, y son manejados de manera que permitan la captura de todo el material orgánico posible. Durante la época seca, se puede sacar agua para irrigación de los canales y las plantas pueden beneficiarse de la humedad que se mueve hacia arriba, por capilaridad, a través del suelo desde el manto freático. Las plataformas elevadas constituyen superficies adecuadas de cultivo aún durante la época más lluviosa. Los niveles de agua en los canales son controlados por un sistema intrincado de canales interconectados, que eventualmente conducen a los ríos de la cuenca, pero el volumen en los canales es muy limitado. Los agricultores frecuentemente tapan los canales a lo largo de sus campos de cultivo durante la estación seca, con el propósito de mantener un manto freático elevado y aún en la estación lluviosa, el flujo de agua fuera del sistema es mínimo. Solamente en las épocas de lluvia excesiva, se drena del área cantidades significativas de agua. La lluvia es tanto una entrada como una herramienta en el manejo del sistema y permite el cultivo continuo durante todo el año.

Agroecosistemas Adaptados a la Lluvia Estacional

Excepto en los trópicos húmedos, un régimen común de lluvia es aquel en el cual una o más estaciones lluviosas están alternadas con períodos secos relativamente largos. En estas áreas, los cultivos son plantados frecuentemente al principio de la estación lluviosa, crecen y se desarrollan mientras hay humedad en el suelo y están listos para la cosecha al final de la época húmeda o al principio de la estación seca.

Este tipo de cultivos de estación húmeda adoptan muchas formas. Por ejemplo, en la mayor parte de la zona central del medio-oeste de los Estados Unidos se siembra trigo de primavera, maíz y soya al final de la primavera y su desarrollo depende de las lluvias convectivas de verano. En los climas mediterráneos a lo largo del mundo, los inviernos húmedos y veranos secos son apropiados para la siembra de granos tales como avena, cebada y centeno; estos cultivos crecen en el invierno y durante el verano se deja descansar la tierra o se emplea para el pastoreo, a menos que se proporcione riego.

Un sistema de cultivo de temporal estacional y de considerable importancia, es el sistema mesoamericano del policultivo maíz/frijol/calabaza. Este sistema de cultivos intercalados está adaptado a un amplio rango de intensidad y cantidad de lluvia, y se encuentra en la mayor parte de América Latina (Pinchinat *et al.* 1976; Davis *et al.* 1986; Laing *et al.* 1984). Estos tres cultivos son sembrados en muchos arreglos, secuencias y patrones diferentes, algunas veces solamente dos de ellos se siembran juntos y en otras ocasiones los tres. Pero independientemente de la combinación, es la llegada de la estación lluviosa la que determina la siembra.

Si son empleadas las prácticas de la agricultura nómada, el desmonte y la quema se realizan durante la estación seca. En algunas ocasiones los agricultores queman hasta que las primeras lluvias de la estación húmeda mojan la capa inferior de residuos vegetales producto del desmonte. Debido a que estas primeras lluvias la mayoría de las veces están alternadas con períodos de sol, la parte superior de los residuos vegetales se seca lo suficiente entre los períodos lluviosos para poder realizar la quema, mientras que la humedad de abajo, recientemente adquirida, previene que el calentamiento excesivo alcance el suelo. De



FIGURA 6.5

Tomates en sistema de agricultura de sequía, en Santa Cruz, California, Estados Unidos. La cobertura del suelo cultivado conserva la humedad cercana a la superficie y controla las arvenses durante el crecimiento que se presentan en un verano de poca lluvia.

esta forma, la semilla del cultivo es plantada dentro de un colchón de ceniza rica en nutrimentos y un estrato protector de materia orgánica sin quemar. Esta práctica logra abastecer de nutrimentos y proteger al suelo de la erosión. La protección del suelo es importante en muchas áreas donde se emplea este sistema de cultivo, porque la mayoría de las veces las primeras lluvias de la estación ocurren como intensos aguaceros convectivos.

Una vez que el período de lluvias comienza, las semillas de los cultivos germinan y se desarrollan rápidamente cubriendo el suelo y protegiéndolo contra las lluvias continuas. El tiempo que le toma al cultivo para madurar (de 4–6 meses) depende de la duración de la estación húmeda.

En áreas tales como las tierras bajas y húmedas de Tabasco, México, se pueden hacer dos siembras de maíz debido a que la estación húmeda es prolongada y caracterizada por una distribución bimodal, con un período máximo de lluvia en junio–julio y el otro en setiembre–octubre. El primer cultivo (llamado *milpa de año*) es sembrado en mayo, al principio de la esta-

ción húmeda, empleando fuego para eliminar la hojarasca y es cosechado en setiembre. El segundo cultivo (llamado *tonalmil*) es plantado inmediatamente después del segundo período máximo de lluvias, a finales de octubre o noviembre y es cosechado a principios de la estación seca a finales de febrero. El segundo cultivo depende en gran medida de que la humedad residual del suelo se extienda hasta la estación seca, y como el cultivo es establecido durante la estación húmeda, cualquier resto vegetal sobre la superficie al momento de la siembra no es quemado. En cada sistema de siembra se utilizan diferentes variedades locales de maíz

Agricultura sin Riego

En muchas partes del mundo, la lluvia durante la estación de cultivo no satisface las necesidades del mismo, ya sea porque no hay suficiente lluvia para contrarrestar la pérdida de humedad por la evapotranspiración, o porque el ciclo del cultivo no coincide con la estación húmeda. El tipo de agricultura desarrollada en tales climas —cuando la irrigación no es una opción— es denominada agricultura sin riego.

La agricultura sin riego, se define como una producción agrícola sin riego en regiones semiáridas del mundo, donde la precipitación anual se encuentra entre 250 y 500 mm (Bregel 1982). La precipitación representa solamente una influencia sobre la agricultura sin riego; la variación anual y estacional de la temperatura y el tipo y distribución de la lluvia también son factores claves. En la mayoría de las regiones secas la agricultura tradicional es el pastoreo, y la siembra de cultivos está limitada a pequeñas áreas manejadas con herramientas manuales o tracción animal. Actualmente, la mecanización ha dado una nueva dimensión a la agricultura sin riego; pero los tipos de labranza, manejo de la semilla y procedi-

mientos de cosecha, permanecen esencialmente sin cambio. En muchos países, el trabajo manual aún juega el papel principal.

Los aspectos más importantes de la agricultura sin riego son: (1) el uso de prácticas de cultivo que promuevan la penetración del agua de lluvia en el perfil del suelo y su almacenamiento en él y (2) el uso frecuente de barbecho de verano o período de descanso, para permitir el reabastecimiento de las reservas de agua agotadas por el cultivo. Otras prácticas también pueden ser importantes. El cultivo de la superficie del suelo durante el ciclo agrícola, es usado para controlar arvenses potenciales demandantes de agua y para crear una "cobertura de polvo", con la superficie pulverizada del suelo, que disminuye la proporción de poros largos y consecuentemente la evaporación. Frecuentemente se siembran cultivares resistentes a la sequía para reducir el uso del agua. En conjunto, todas estas prácticas permiten que una mayor proporción de la humedad proveniente de la lluvia sea canalizada a través del cultivo en lugar de pasar del suelo a la atmósfera.

Los sistemas agrícolas modernos sin riego más desarrollados, al menos en términos de manejo intensivo y tecnología, están en Australia, Canadá y los Estados Unidos. En todas estas regiones, el cultivo de granos es el principal enfoque. Sin embargo, en Australia, la rotación de trigo con pastoreo, especialmente de ovejas para la producción de lana, ha llevado al desarrollo de un sistema único, donde un cultivo de grano es desarrollado alternativamente con la pastura. Actualmente, la pastura permite el reabastecimiento de las reservas de humedad necesarias para producir los granos.

Un ejemplo único de agricultura sin riego ocurre en la región costera de California Central, donde varios cultivos de hortalizas son sembrados en mayo, al principio del verano seco Mediterráneo, ya sea a par-



FIGURA 6.6
Árboles frutales y olivos en el desierto de Negev cerca de Avdat en Israel. La lluvia es recolectada de las colinas circundantes para proporcionar humedad al suelo de la huerta.

tir del trasplante de plántulas o por siembra directa. En este clima raramente llueve en el verano, por lo tanto, estos cultivos hortícolas dependen solamente de las reservas de humedad almacenadas en el suelo. El tomate parece ser un cultivo particularmente bien adaptado a este sistema. Las plántulas de tomate son sembradas a buena profundidad en el suelo húmedo en mayo, sin la aplicación de riego. El cultivo de la superficie del suelo mantiene una cobertura de polvo libre de arvenses, y debido a que la superficie está seca y no llueve durante la etapa de crecimiento, no se colocan estacas ni se amarran las plantas y las enfermedades fungosas son un problema menor. La cosecha se inicia a finales de agosto y continua hasta las primeras lluvias de la nueva estación húmeda, usualmente a finales de octubre o a principios de noviembre. Los tomates cultivados mediante este sistema tienen muy buena reputación por su sabor más concentrado.

La sostenibilidad de los sistemas agrícolas sin riego debe ser evaluada por la pérdida potencial de materia orgánica en los estratos superiores del suelo, como consecuencia del uso del sistema de cobertura de polvo, el peligro de la erosión del suelo a causa del

viento y la lluvia por el bajo nivel de cobertura del mismo, y la impredecibilidad en la disponibilidad de la humedad del suelo como resultado de una lluvia variable durante el período de barbecho. Pero en áreas de baja e impredecible precipitación, la agricultura sin riego puede ser una alternativa de agricultura de bajos insumos externos.

ESTUDIO DE CASO

Agricultura Hopi

En el suroeste de los Estados Unidos, los Hopi han tenido una agricultura por más de 500 años en un paisaje árido, cubierto principalmente por plantas adaptadas al desierto. Su éxito se basa en una estrategia de facetas múltiples: ellos toman ventaja de la concentración y almacenamiento natural del agua, construyen estructuras para recolectarla y siembran variedades de cultivos adaptadas a las condiciones locales.

La precipitación total anual en las áreas donde los Hopi cultivan son en promedio de 225 a 325 mm. Casi toda esta precipitación se concentra en dos períodos cortos durante el año. En el invierno, ocurre principalmente como nieve en las montañas y a finales del verano, viene en cortos aguaceros durante las tormentas convectivas. Este régimen de precipitación implica varios retos para la agricultura. Los cultivos no pueden ser desarrollados durante el frío invierno, cuando la precipitación es más abundante, y la lluvia de verano es usualmente muy intensa y de poca duración para percolarse en el suelo; la mayoría de ella se pierde como escorrentía.

Los Hopi han aprendido que el suelo y la topografía local les permiten transformar estos retos en ventajas. Ellos establecen su principal cultivo, el maíz, en los arroyos. El suelo de los arroyos es franco arenoso, depositado por muchos años de inundaciones rápidas y esta cubierto por arena pura, depositada sobre la superficie del suelo por los vientos del verano. Ellos se asientan sobre la parte superior de un estrato de pizarra que forma una barrera impermeable.

Sistemas de Cosecha de Agua en Regiones Áridas

En las regiones cálidas del mundo con climas áridos (menos de 250 mm de precipitación anual), la falta de lluvia es un factor limitante severo para la agricultura. Sin embargo, en muchos de esos lugares, la precipitación se presenta con alguna regularidad en forma

Cuando la nieve se derrite, la escorrentía fluye hacia los arroyos. Fácilmente penetra el suelo arenoso y ahí es atrapada por el estrato de pizarra. Cuando la primavera inicia, la parte superior del estrato de arena es secado rápidamente por el sol y el viento y forma una costra que sirve para proteger de la desecación las capas más bajas del suelo.

Los Hopi siembran su cultivo de maíz a finales de la primavera, colocando cada semilla en un hoyo a una profundidad de 15 a 25 cm, para darle acceso a la humedad que se encuentra abajo. Esta humedad es suficiente para permitir la germinación y desarrollo del maíz hasta que empiezan las lluvias de verano en julio o agosto.

Para aprovechar la mayor parte de las lluvias de finales de verano, los Hopi construyen cada año un sistema de presas y diques. Estas estructuras tienen un propósito doble: protegen al cultivo del maíz de las rápidas inundaciones potenciales y dispersan el caudal de agua, como una capa de flujo lento, permitiendo que se percole en el suelo. Manejadas en esta forma, las lluvias de verano proporcionan humedad adicional suficiente para permitir que el maíz se desarrolle, y depositan suelo aluvial que renueva la fertilidad de los campos. Como un beneficio adicional, el depósito aluvial se seca y da lugar a una superficie endurecida y quebradiza que protege al agua que se encuentra almacenada en el suelo, tal y como la costra de arena lo había hecho anteriormente.

El componente final de la estrategia de manejo Hopi es sembrar una raza local de maíz. Las plantas permanecen relativamente bajas, lo que les permite resistir las ráfagas de viento que frecuentemente ocurren durante la estación, y producen una raíz principal larga que puede acceder la humedad a gran profundidad en el suelo.

de cortas tormentas torrenciales, y es posible "cosechar" esta agua recolectando y concentrando la escorrentía producida por la lluvia.

En el desierto de Negev en Israel, los sistemas de pequeñas granjas con captura de escorrentía, que una vez fueron abandonados, han sido reconstruidos, lográndose rendimientos equivalentes a los obtenidos en granjas con riego en la misma región (Evenari *et al.* 1961). La unidad agrícola consiste de áreas de captura de lluvia localizadas sobre las pendientes de la cuenca que rodea los canales de drenaje, donde la escorrentía es recolectada. Mediante canales bajos de piedra, se conduce la escorrentía de la lluvia hacia la pequeña planicie de inundación de los canales. Este sistema puede recolectar entre 20% y 40% de la lluvia, y la remoción de rocas sueltas en la superficie del suelo sobre los lados de las colinas, puede incrementar la captura de la escorrentía hasta en 60%. Pequeñas presas de control, localizadas en los canales más largos, en la base de las pendientes, concentran la escorrentía a una profundidad suficiente para que el agua penetre aproximadamente 2 m, posteriormente el suelo se seca y deja una costra relativamente impermeable a la pérdida de agua por evaporación. Conforme cada presa de control se llena, se derrama sobre otra localizada abajo, regando un sistema complejo de lotes de cultivo en la planicie de inundación. Los rendimientos de los cultivos de grano tales como cebada y trigo, y frutas como almendras, duraznos y avas son considerablemente altas para una región árida. Más que crear grandes reservorios de agua, que en este clima se evaporaría casi en su totalidad (y acumularía sedimentos ricos en nutrimentos), tanto el agua como los sedimentos ricos en nutrimentos son almacenados *in situ* en el sistema de cosecha de agua.

Un sistema similar aún es usado en el árido suroeste Americano, donde por muchos siglos los nativos americanos como los Hopi y los Papago han practicado una forma de recolección de agua (ver el caso de estudio). El caudal producido en las montañas por las fuertes lluvias convectivas durante el verano, es desviado hacia los abanicos aluviales como escorrentía suave, en vez de permitir que se concentre en el canal de un cauce. De esta forma, esta lámina de agua "riega" cultivos anuales de maíz, frijol, calabaza y otras especies locales. La cuenca superior no es manipulada como en el sistema Negev, pero se lleva a cabo una

manipulación semejante de la escorrentía sobre la planicie de inundación. Los objetivos de ambos agroecosistemas son producir con las restricciones y límites que impone el régimen natural de lluvia.

Sistemas de Pastoreo

En regiones donde la lluvia es tanto limitada como impredecible, la vegetación natural está constituida por una mezcla de arbustos "buscadores de agua" y resistentes a la sequía, así como por pastos perennes y especies anuales que pueden germinar y completar su ciclo de vida en los cortos períodos cuando hay disponibilidad de agua. La tolerancia a la sequía por los cultivos perennes, está combinada con la susceptibilidad de los cultivos anuales para formar un sistema que puede producir biomasa durante la mayor parte del año. En muchas partes de mundo, este tipo de ecosistema está asociado con poblaciones extensivas de animales nativos de pastoreo. Cuando consideramos la habilidad de los animales de pastoreo para moverse en busca de forraje adecuado, tales ecosistemas reflejan una considerable adaptabilidad y diversidad.

Lo interesante es que se supone que algunas de las primeras domesticaciones de animales de pastoreo se efectuaron en áreas de ambientes semiáridos extremos. Los animales preadaptados en estado salvaje para subsistir con coberturas vegetales dispersas, tales como los parientes salvajes de las ovejas y las cabras, constituyeron un importante recurso para la supervivencia humana en un ambiente que de otra forma hubiese sido muy hostil. Se considera que los grupos nómadas representan una forma importante de agricultura temprana.

Actualmente, muchos sistemas de manejo de pasturas aprovechan la capacidad del pasto o de los ecosistemas de praderas para mantener la producción de biomasa con una baja y muy variable precipitación. En la mayoría de los casos, la pastura natural es manejada con cargas animales específicas y tiempos de pastoreo acordes con la dinámica natural del crecimiento de las plantas en respuesta a la lluvia. Los animales son movidos de una parte de la pradera a otra durante el año conforme la disponibilidad de forraje cambia. En otros casos, la pradera es mejorada con la introducción de especies forrajeras tolerantes a la sequía que son muy exitosas bajo condiciones más secas.

Lecciones a Partir de los Sistemas Sostenibles

En todo el mundo se han desarrollado tecnologías de riego para compensar la irregularidad del factor lluvia, pero las consecuencias ecológicas de esas tecnologías se han comenzado a manifestar de muchas maneras. La erosión del suelo, la sedimentación, la salinización y la pérdida de humedales naturales y de sistemas de cuenca, son solo algunos de los problemas. Se espera que examinando la naturaleza de la humedad y de la lluvia tal y como lo hemos hecho en este capítulo, así como el ejemplo de los agroecosistemas que funcionan según sus condiciones locales de precipitación en vez de ir contra ellas, podamos tener un vistazo de la sostenibilidad.

Para un factor tal como la lluvia, la naturaleza puede servir como un modelo útil para desarrollar una agricultura sostenible. Mucho de nuestro desarrollo agrícola actual ha controlado la falta o exceso de lluvia, eliminando o alterando las condiciones para satisfacer las necesidades de los sistemas de cultivo que se van a introducir. Esto involucra usualmente altos niveles de insumos externos de energía o materiales. Existen muchos y muy conocidos ejemplos de proyectos de irrigación masiva, drenaje, o desalinización, que han intentado alterar las condiciones ecológicas existentes, pero solamente han alcanzado un éxito limitado cuando son evaluados en términos de productividad del cultivo, viabilidad económica y nivel de bienestar social. Necesitamos intensificar la búsqueda de formas que permitan adaptar la agricultura a la variabilidad natural e impredecibilidad de la precipitación.

Ideas para Meditar

1. Desde el punto de vista de la agricultura sostenible ¿Cuáles son algunos de los beneficios y efectos perjudiciales de la irrigación cuando se emplea, como un medio para contrarrestar la limitación de lluvia?
2. ¿Cómo son afectados los patrones de lluvia por la topografía? ¿Cómo ha sido adaptada la agricultura a las variaciones de los patrones de lluvia causados por las condiciones topográficas?
3. ¿Cuáles son algunos de los posibles papeles ecológicos de una estación seca para los ecosistemas?
4. ¿Cuál es la mejor manera de preparar un agroecosistema, a la impredecible precipitación?

Lecturas Recomendadas

Barry, R. C., and J. Chorley. 1987. *Atmosphere, Weather, and Climate*. Fifth edition. Methuen:London. Un tratado actual sobre climatología que enfatiza las formas en que las interacciones complejas entre la atmósfera y las condiciones de tiempo crean los climas en el mundo.

Clarke. R. 1993. *Water: The International Crisis*. MIT Press: Cambridge, MA.

Una revisión sobre cómo el uso adecuado e inadecuado del agua, por parte de las culturas, amenaza el futuro del abastecimiento de agua potable y en la cantidad necesaria para el mundo.

Critchfield, H. J. 1974. *General Climatology*. Third Edition. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ.

Un texto clásico sobre los procesos y fenómenos que crean los climas del mundo.

Nabhan, G. P. 1982. *The Desert Smells Like Rain: Naturalist in Papago Indian Country*. North Point Press: San Francisco, CA.

Un análisis detallado de cómo el agua es la vida y sangre del ecosistema desértico y los humanos que lo habitan.

Postel, S. 1992. *The Last Oasis: Facing Water Scarcity*. W.W. Norton: New York.

Un análisis crítico de lo que está llevando a la civilización humana hacia una escasez de agua, y de lo que se debe hacer para evitar una crisis global.

Reisner, M. 1986. *Cadillac Desert: The America West and its Disappearing Water*. Island Press: Covelo, CA.

Una historia política perceptiva de la captación y control de agua para el desarrollo humano en el oeste de los Estados Unidos.

Wilken, G. C. 1988. *Good Farmers: Traditional Agricultural Resource Management in Mexico and Central America*. Univ. Calif. Press, Berkeley.

Un estudio excelente de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas tradicionales, con las prácticas de manejo de agua, ofreciendo ejemplos.

EL VIENTO

El viento puede tener impactos significativos en los agroecosistemas a pesar de no estar siempre presente como un factor ambiental. Estos impactos son el resultado de la capacidad del viento para: (1) ejercer una fuerza física en la planta, (2) transportar dentro y fuera de los agroecosistemas materiales y partículas -sal, polen, suelo, semillas y esporas de hongos- y (3) mezclar la atmósfera que rodea a la planta y de este modo cambiar la composición, las propiedades de dispersión de calor y el efecto sobre la fisiología de la planta.

Cuando se consideran todos estos efectos, lo que parecería un simple factor ambiental se convierte en algo complejo. El viento puede tener simultáneamente impactos positivos y negativos o puede ser deseable en algunos momentos e indeseable en otros; por lo tanto, se puede decir que el viento es un factor difícil de controlar.

MOVIMIENTO ATMOSFÉRICO

La atmósfera terrestre se encuentra en constante movimiento, es compleja y con patrones locales variables. Esta circulación es la responsable del movimiento de las masas de aire y de los cambios violentos del clima, asimismo, es la responsable de crear el movimiento eólico de la superficie, el cual conocemos como viento.

La diferencia entre el calentamiento y enfriamiento de la corteza terrestre es el proceso básico en la conducción de los movimientos atmosféricos. En las regiones ecuatoriales, el calentamiento intenso de la superficie y de la atmósfera circundante provoca la expansión y elevación del aire hacia la atmósfera, creando una zona de baja presión. El aire de una superficie fría, lejana al Ecuador se desplaza tomando el lugar de las masas de aire que se elevan, mientras en la parte superior de la atmósfera, el aire caliente

se desplaza hacia los polos. En las regiones polares ocurre lo contrario, el aire se enfría más rápidamente en la atmósfera y desciende a la superficie creando una zona de alta presión y un movimiento eólico desde la superficie hacia el Ecuador.

Como resultado de la zona ecuatorial de baja presión y de las zonas polares de alta presión, se crean grandes células de circulación en cada hemisferio, tal como se muestra en la Figura 7.1. La corriente de aire en las células ecuatoriales y en las células polares crea una célula adicional en la región templada de cada hemisferio. A causa de esto, hay una zona de baja presión (aire ascendente) alrededor de los 60° norte y los 60° sur, además hay una zona de alta presión (aire descendente) a 30° norte y a 30° sur.

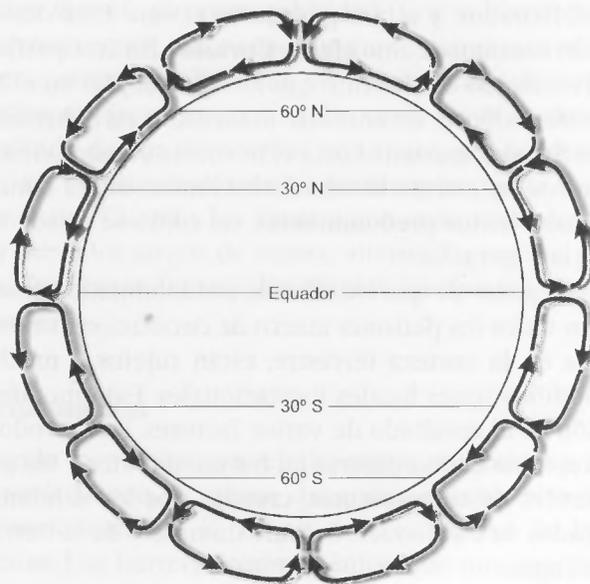


FIGURA 7.1
Esquema latitudinal de las células de circulación atmosférica.

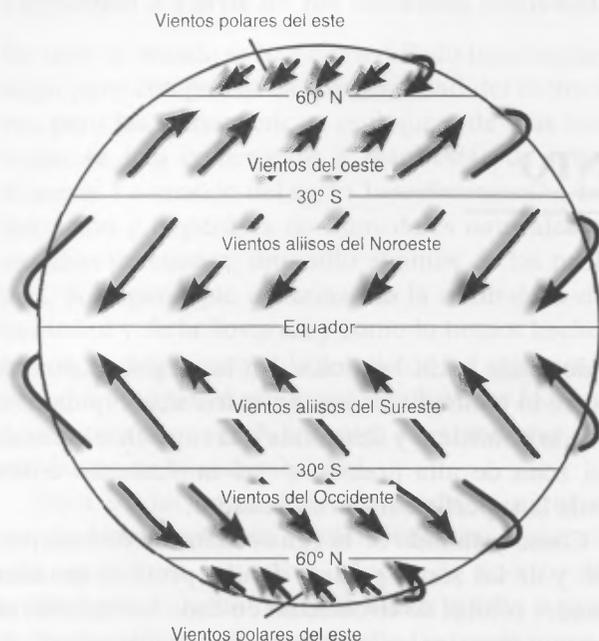


FIGURA 7.2
Patrón de los vientos predominantes.

La rotación de la Tierra altera el flujo de estas células de circulación a gran escala. Las corrientes de aire se desvían hacia la derecha del gradiente norte del Ecuador y a la izquierda en el sur. Esta desviación se conoce como **efecto Coriolis**. En la superficie, el resultado es el viento que tiende a soplar en el hemisferio Norte de noroeste al sureste y en el hemisferio Sur del suroeste hacia el noroeste. A estos vientos típicos en ciertas bandas latitudinales se les conoce como **vientos predominantes**, tal como se puede ver en la Figura 7.2.

A pesar de que los vientos predominantes describen todos los patrones macro de circulación atmosférica en la corteza terrestre, están sujetos a muchas modificaciones locales y estacionales. Esta modificación es el resultado de varios factores, incluyendo la presencia de cordilleras en los continentes y los gradientes de temperaturas, creadas por los diferentes grados de enfriamiento y calentamiento de la tierra y del agua.

El resultado de todos estos factores juntos, es la formación de extensas masas de aire de baja presión y de alta presión, que tienen gran influencia en el patrón de movimiento de los vientos locales. En el hemisferio Norte, el aire circula alrededor de las células

de alta presión en el sentido de las manecillas del reloj, y alrededor de las células de baja presión en sentido contrario, mientras que en el hemisferio Sur, las direcciones son inversas. En ambos hemisferios, el aire circula desde las áreas de alta presión hacia las de baja presión.

VIENTOS LOCALES

El viento es generado también por condiciones locales, las cuales tienen que ver con muchos factores, tales como la topografía local y la proximidad de los cuerpos de agua. Cabe mencionar que en ciertas áreas, estos vientos son relativamente predecibles.

Durante el verano, en las zonas costeras y cerca de los grandes cuerpos de agua como lagos o represas, los vientos diurnos (llamados brisa marina y lacustre) soplan hacia la tierra, porque la masa de tierra cercana se calienta más rápido que el cuerpo de agua. El aire cerca de la superficie del suelo se calienta, se expande y se eleva, después el aire más frío que está sobre el océano fluye a la tierra para sustituir al aire ascendente. En la noche el proceso puede cambiar, porque la masa de tierra se enfría más rápidamente que el agua, por lo cual el viento comienza a moverse hacia el agua.

Los **vientos de laderas** son otro tipo de vientos locales. En zonas montañosas, cuando la tierra irradia calor a la atmósfera durante la noche, el aire cercano a la superficie también se enfría. Debido a que el aire frío es más denso, éste comienza a fluir hacia abajo, tal movimiento es muy localizado al principio, pero con el tiempo, los vientos que bajan hacia un solo cañón pueden juntarse con un sistema completo de valles para crear un **viento de montaña**. Durante el día puede ocurrir el efecto contrario, un **viento de valle** formado por el calentamiento de la superficie del valle provoca que el aire caliente se eleve sobre la montaña.

Cuando extensas masas de aire atraviesan una cordillera y bajan hasta una llanura o valle, la masa de aire descendente se expande; como resultado, ésta se calienta y su humedad relativa baja. Este proceso de calentamiento y secado se llama **calentamiento catabático** y es el responsable del efecto de sombra de lluvia familiar. Los vientos causados por calor catabático ocurren frecuentemente en el invierno en la vertiente este de la Sierra Nevada y de las Monta-

ñas Rocosas, cuando un sistema de tormenta ciclónica se mueve hacia el interior de la tierra y empuja al aire por encima, forzándolo a salir de la cordillera. Cuando el aire descendente del este, o a sotavento de las montañas, crea vientos cálidos conocidos como chinooks* los cuales pueden ser muy lluviosos y además derriten rápidamente la nieve que hay sobre la superficie. Generalmente, debido a que la tierra se congela durante la corta duración del viento, las plantas pueden sufrir un daño considerable por desecación.

De vez en cuando, durante el verano, ocurre un tipo de viento similar en la vertiente costera de California del Sur y de Chile Central. Cuando las células de alta presión se forman tierra adentro, el aire descendente junto con estas células, son impulsadas fuera de las montañas de alcance costero y hacia abajo de la planicie costera. Los vientos cálidos, llamados del ocaso o Santa Anas, pueden surgir rápidamente al final del día, incrementado la temperatura de 10°C a 15°C y disminuyendo la humedad relativa cerca del punto de condensación a menos del 20%, todo esto en pocos minutos. Este es un tiempo de gran peligro de incendios; las cosechas pueden dañarse por la sequía y por las ráfagas de viento. En el istmo de Tehuantepec, situado al sur de México, puede ocurrir un fenómeno similar durante los meses secos. Los sistemas de alta presión del oeste del país crean vientos de ladera en el lado oriental. Estos vientos, llamados surres, acentúan la aridez de los meses de estación seca.

EFFECTO DIRECTO DEL VIENTO SOBRE LAS PLANTAS

Los efectos físicos del viento en los organismos pueden tener importancia ecológica considerable. Esto es especialmente evidente en áreas con vientos constantes, como en llanuras cercanas a la costa. En general, la magnitud del efecto de los vientos depende de su intensidad, duración y ritmo, como todos los factores ambientales.

Desecación

Cada hendidura de los estomas en la hoja de la planta, deja un espacio de aire en el cual ocurre intercambio de gas alrededor de las membranas de la pared celular. Este espacio de aire se satura con humedad y

tan pronto como los estomas se abren el vapor de agua dentro de la hoja sale. Cuando no hay movimiento de aire, el movimiento externo de aire saturado de los estomas crean una **capa límite** de aire saturado alrededor de la superficie de la hoja. El movimiento de aire remueve esta capa, aumenta la transpiración e incrementa la pérdida de agua de la planta. El grado de desecación aumenta proporcionalmente con la velocidad del viento hasta una velocidad máxima de 10 km/h, con la cual se alcanza la máxima pérdida de agua.

La pérdida normal de agua de la planta puede ser fácilmente reemplazada por la absorción desde la raíz y su posterior transporte a las hojas. El marchitamiento ocurre si el porcentaje de desecación excede de la sustitución. El marchitamiento excesivo puede afectar seriamente la función normal de la hoja, en especial de la fotosíntesis, reduciendo el crecimiento de toda la planta e incluso provocando su muerte.

Enanismo

Existe una correlación directa entre el viento y la disminución de la estatura de la planta. Las plantas en ecosistemas de dunas costeras y en ecosistemas alpinos frecuentemente son pequeñas debido a los constantes vientos de gran velocidad. Los cultivos que crecen en zonas con viento constante tienen, normalmente, menor estatura que los mismos cultivos sembrados en áreas sin viento. La corta estatura es el resultado de una desecación constante, que ocasiona que las células sean más pequeñas y la planta más compacta. Cuando los vientos son más variables y hay períodos largos de calma, alternados con períodos de vientos fuertes, las plantas no tienden a ser enanas.

Deformación

Cuando los vientos son relativamente constantes y la mayoría tienen la misma dirección, pueden alterar permanentemente la forma de crecimiento de las plantas. Las barreras rompevientos, que muestran el desarrollo de una planta deformada o torcida, son buenos indicadores de un viento predominantemente constante. La deformación puede tener muchas formas, desde una inclinación permanente en dirección del viento, hasta una forma de bandera o bien con

*viento cálido del Oeste de los Estados Unidos

una apariencia debilitada. Los vientos helados también contribuyen a la deformación vegetal.

Daño de Plantas y Volcamiento

Los vientos excesivos pueden causar daño a las plantas, a pesar de ser eventos relativamente inusuales y en especial, si ocurren durante los aguaceros o las nevadas. Las hojas pueden ser despedazadas o arrancadas, rasgada su superficie, quebradas las ramas y arrancadas las copas de los árboles, e incluso, volcar árboles enteros. En zonas donde ocurren los huracanes, ciclones o tornados, los árboles grandes que han crecido durante muchos años también pueden sufrir daños severos. Todos los árboles altos y solitarios, que no han tenido una tala selectiva, están muy expuestos a los vientos y caen una vez que pierden la protección que poseen los árboles en un bosque. Esta clase de daño demuestra la importancia de las barreras rompevientos (tema que discutiremos más adelante en este capítulo).

En los agroecosistemas, los daños por viento ocurren con mayor frecuencia en cultivos anuales cercanos a la madurez, cuando las plantas están más gruesas en la parte superior, con granos o frutos. Este tipo de daño, donde el cultivo en pie es aplastado en su totalidad es llamado **acame**. En cultivos frutales como manzanas y ciruelas, el viento puede disminuir la polinización en la etapa de floración y causar la caída de los frutos antes de la cosecha.

Cambios en la Composición del Aire Alrededor de las Plantas

Además de la desecación y la alteración física en la forma de la planta, el viento también puede cambiar la calidad del aire alrededor de ésta. El aire que se encuentra rodeando un organismo es importante, pues constituye el medio por el cual se da el intercambio calórico y gaseoso. La atmósfera afecta directamente a las plantas puesto que provee el CO_2



FIGURA 7.3
Acame de maíz por una ráfaga de viento cerca de Cárdenas, Tabasco, México.

necesario para la fotosíntesis y el oxígeno.

El aire está compuesto de 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 0,03% de CO_2 (el restante menor al 1%, es una mezcla de vapor de agua, polvo, humo, contaminantes y otros gases). Sin embargo, en la atmósfera circundante de las plantas, los niveles de oxígeno y CO_2 varían considerablemente, ya que las plantas producen oxígeno y lo convierten en CO_2 .

Durante el día, los niveles de oxígeno alrededor de la planta se incrementan drásticamente, acompañado por un descenso del CO_2 como resultado del proceso fotosintético. El crecimiento de la planta puede reducirse si los niveles de CO_2 son muy bajos, ya que la fotosíntesis se limita. Sin embargo, el movimiento eólico actúa para mezclar el aire alrededor de las plantas, perturbando la capa externa enriquecida de oxígeno y acelerando la difusión del CO_2 hacia los estomas. De esta manera, el viento puede ser realmente benéfico para las plantas.

OTROS EFECTOS DEL VIENTO

El viento impacta directamente a las plantas individuales, tal como se discutió anteriormente, pero, debido a su habilidad para transportar materiales, tiene diferentes efectos dentro de los agroecosistemas.

Erosión Eólica

En cualquier región con escasas y variables lluvias (con probabilidad de sequía), los vientos con gran velocidad, ocasionales o frecuentes, provocan gran evaporación superficial del suelo. En estas zonas, la erosión del suelo por el viento puede ser un problema. Bajo tales condiciones, el suelo finamente granuloso, llano, seco, desprovisto total o parcialmente de vegetación es erosionado fácilmente por el viento.

La pérdida de suelo por erosión eólica incluye dos procesos: el desprendimiento de partículas y el transporte de éstas. El viento agita las partículas de tierra y finalmente las levanta y desprende del suelo del cual forman parte. Estas partículas son transportadas de diferentes maneras, dependiendo del tamaño y de la velocidad del viento. Pequeñas partículas de suelo que irrumpen la superficie, estando a 30 cm de arriba de éste, son transportadas por un proceso llamado **saltación**. En la mayoría de los casos, del 50% al 70% del movimiento del suelo se debe al viento. El impacto de estas partículas hace rodar partículas más grandes, que se deslizan por la superficie, creando un movimiento lento del suelo, el cual representa entre el 5% y el 25% del movimiento del suelo. La forma de transporte más visible es cuando las partículas del tamaño de arena fina, se mueven paralelamente a la superficie y se convierten en partículas volátiles. Las turbulencias pueden alzar nubes de estas partículas varios kilómetros hacia la atmósfera y cientos de kilómetros lejos de donde se originó ese viento, para establecerse finalmente sobre el suelo nuevamente o desvanecerse en el aire. Generalmente, tal erosión representa el 15% del total, pero en algunos casos se sabe que sobrepasa el 40%.

Cuando la agricultura se practica en regiones del mundo donde el suelo está desprotegido, éste se expone a la erosión eólica y se pueden perder grandes cantidades de tierra fértil. La desertificación en el Sahel de África fue en gran parte intensificado en los años 70, de-

bido a la erosión del suelo causada por la sequía, el sobrepastoreo y la siembra intensiva en suelos de tierras marginales. Las grandes nubes de tierra levantadas por el viento y el polvo generado durante el gran "dust bowl" de los años 30 en los Estados Unidos, es aún uno de los ejemplos más representativos del impacto físico del viento en los sistemas agrícolas por la pérdida de suelo.

El suelo extraído de un lugar y puesto en otro constituye un problema doble por erosión eólica. Cuando se practica la agricultura en lugares expuestos a la erosión eólica, se deben considerar las medidas necesarias para no reducir la productividad del cultivo.

Transporte de Sal del Océano

En lugares aledaños a la costa, el efecto físico del viento se puede combinar con el efecto químico dañino del depósito de sal. Al romper las olas, se forman burbujas y pequeñas gotas de agua de sal, que son arrojadas al aire y que pueden ser llevadas tierra adentro. La sal que contienen éstas puede ser depositada sobre la superficie de las hojas. La sal y el rocío

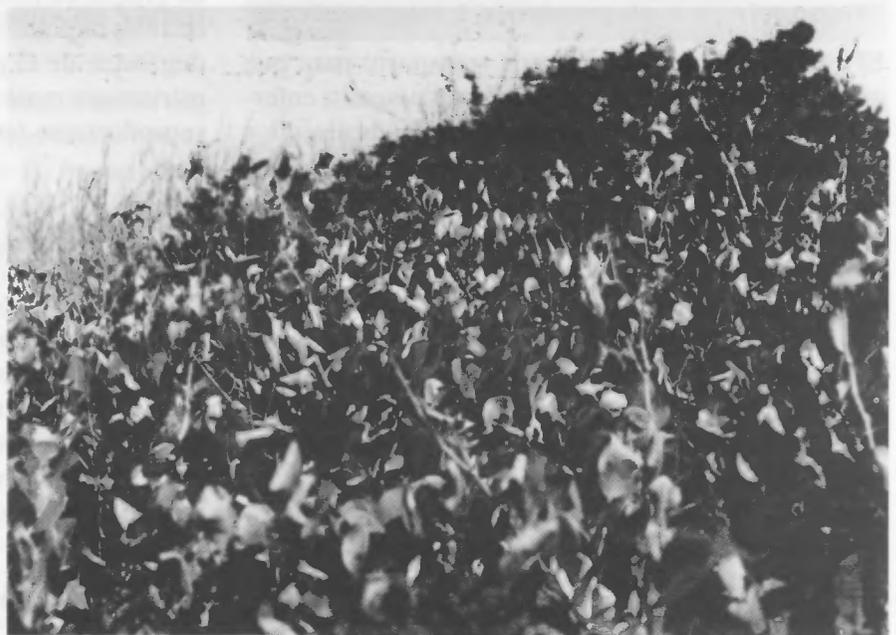


FIGURA 7.4

Arbusto costero con las hojas quemadas y defoliación causada por el depósito de sal del océano, cerca de Paraíso, Tabasco, México. Nótese el efecto de defoliación constante en la parte izquierda de la planta, que está expuesta directamente al viento.

*Nombre dado a los Estados que fueron devastados por la sequía y por los vientos altos en 1930 (Texas, Oklahoma, Kansas, Colorado y Nuevo México)

salino, llevados por el viento, pueden quemar las orillas de las hojas e incluso causar defoliación.

El daño causado por la sal transportada por el viento puede presentarse incluso a muchos kilómetros de la costa hacia el interior, pero los efectos más dañinos de la sal se observan cerca de la costa. Los vientos de tormentas sin lluvia causan los mayores daños por la sal. El transporte y el depósito de sal por el viento puede tener mayor impacto en la zona de vegetación a lo largo de la costa, y solamente los cultivos tolerantes a la sal pueden ser plantados en las áreas expuestas al depósito de este compuesto.

En algunos lugares, las características topográficas naturales alrededor de la costa, como dunas de arena, bloques de sal llevados por el viento, permiten la siembra de cultivos sensibles a la sal en el lado contrario. Por ejemplo, los árboles de aguacate, alguna vez fueron plantados en lugares protegidos alrededor de la costa de California, de Santa Bárbara a San Diego (pero recientemente estas áreas protegidas son muy buscadas para la construcción de residencias). Las barreras rompevientos también pueden usarse para lograr el mismo efecto.

Transporte de Enfermedades y Plagas

El viento sirve como medio de transporte para que gran cantidad de organismos que son plagas o enfermedades en los agroecosistemas. Las bacterias y los hongos dependen del viento que transporta las esporas de plantas infectadas a nuevos hospedantes; muchas especies de insectos aprovechan el viento para moverse a largas distancias. Por ejemplo, varios áfidos, tienen una etapa alada para la dispersión y una etapa áptera para el desarrollo de poblaciones sedentarias en las plantas hospedantes. Las alas de estos áfidos no sirven más que para sostenerlos en vuelo mientras el viento los lleva. Por supuesto, si el sitio de aterrizaje es una planta hospedante sin infectar, se desarrolla un nuevo problema de la plaga.

Las hembras de muchos insectos plaga como las del gusano de la manzana, liberan una feromona sexual y dependen de la dispersión de este compuesto por el viento, para atraer a los machos para el apareamiento. En los agroecosistemas las semillas de gran número de plantas no deseadas o arvenses son dispersadas también por el viento.

Desde pequeños propágulos e incluso pequeños

organismos, pueden elevarse cientos de metros en el aire y las corrientes los transportan a miles de kilómetros. Es muy difícil para los agricultores escapar de constantes "lluvias" de problemas potenciales. El tema de manejo de los agroecosistemas y los problemas de dispersión se tratan en el Capítulo 16.

Efectos Benéficos del Viento

Algunos de los efectos benéficos más importantes del viento se presentan a nivel de microclima. En el interior de los agroecosistemas, especialmente en el follaje de los cultivos, el movimiento eólico es indispensable para mezclar la atmósfera. Una buena circulación del aire mantiene los niveles óptimos de CO₂ y dispersa el exceso de humedad, puede incluso incrementar el intercambio gaseoso. Una mezcla adecuada de aire disminuye los niveles de humedad en la superficie de las hojas y con ello, reduce el ataque potencial de muchas enfermedades. En climas cálidos, el viento tiene un efecto importante al aumentar la conducción y el enfriamiento evaporativo causado por el sol.

El viento también es necesario para la producción de granos como el maíz, la avena y el trigo. En estos cultivos la polinización es mediante el viento, porque dependen de él para la distribución del polen de las estructuras masculinas de la planta, a las estructuras reproductoras femeninas de otras plantas.

MODIFICACIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL VIENTO EN LOS AGROECOSISTEMAS

El entendimiento de los impactos que puede tener el viento en los agroecosistemas, así como los mecanismos de esos impactos, le da a los agricultores la oportunidad de desarrollar medidas tanto para mitigar los efectos negativos como para aprovechar los efectos positivos. Además, en la agricultura se puede utilizar la energía del viento para gran cantidad de actividades.

Medición del Viento

El viento es medido comúnmente por un instrumento conocido como anemómetro. El anemómetro de cazoletas consiste en tres o cuatro brazos rotatorios, con pequeñas cazoletas al final de cada uno de ellos, estos brazos están asegurados a un eje vertical que

activa un captador o registrador de datos. Este implemento puede registrar el viento de cualquier dirección horizontal y basado en el total de revoluciones medidas, determina la velocidad promedio del viento. Un anemómetro de hélices puede registrar vientos de poca velocidad de manera más exacta, pero tiene que ser puesto en la dirección del viento. Los anemómetros termales, que operan con base en la relación entre la ventilación y la transferencia de calor, son usados para vientos de velocidades muy bajas, que no son registradas bien con el sistema de cazoleta o de hélices. Existen otros tipos de equipos para registrar las ráfagas y la dirección del viento.

El promedio de la velocidad y dirección del viento es solamente una parte de lo que se necesita entender de los patrones del movimiento eólico en un agroecosistema. Es importante conocer cómo los patrones de vientos locales son reducidos a patrones microclimáticos con las barreras rompevientos. Estas barreras pueden ser: plantas individuales, variación topográfica natural o barreras puestas intencionalmente. Su uso depende de la manera en que afecta el viento, así tratamos de modificar o tomar ventaja de él.

Técnicas para Modificar los Patrones de Viento y para Mitigar sus Efectos

Hay muchas maneras de manejar el viento en los sistemas agrícolas. Algunas son tan simples como ubicar los callejones de las plantaciones, de tal manera que formen un túnel a través del cual pasen los vientos predominantes; otros son más complejos, como plantar barreras rompevientos o protectores contra viento; o usar sistemas de cultivos intercalados, donde se combinen cultivos sensibles al viento con otros más tolerantes.

Rompevientos

Las barreras rompevientos (también son conocidas como protectores de viento y como hileras de arbustos) son estructuras -generalmente hechas de árboles- que modifican la corriente del viento con el propósito de reducir la erosión eólica, incrementar la producción de cultivos, proteger los campos y otras estructuras, o una combinación de estos propósitos. Las barreras rompevientos no son una forma de detener el viento, sino de cambiar su curso y su veloci-



FIGURA 7.5

Rompevientos para mejorar el microclima de una plantación de manzana adyacente, cerca de Lincoln, Nueva Zelanda. Esta barrera rompevientos está hecha de árboles sauces (Salix sp.).

dad de corriente. Por lo general, están orientadas perpendicularmente al viento (si su propósito es modificar la corriente) o a lo largo del ángulo de la corriente del viento (si su objetivo es redireccionar el viento). Cuando en los agroecosistemas se usan árboles para crear barreras rompevientos permanentes, el resultado es un sistema agroforestal.

En todo el mundo se ha llevado a cabo una intensa investigación sobre la tecnología de las barreras rompevientos y sobre el impacto de estas estructuras en los cultivos (Brandle y Hinte 1988). Se ha demostrado que las barreras rompevientos alteran drásticamente los patrones de la corriente y velocidad del viento, y como resultado reducen muchos de sus impactos negativos descritos con anterioridad, mientras



FIGURA 7.6
Barreras rompevientos en la región árida cerca de Eilat, Israel.
Estas barreras reducen la pérdida de agua por evapotranspiración en los cultivos anuales con riego plantados entre ellos.

se aprovechan algunos de los efectos positivos. En conclusión, éstos benefician la producción animal y agrícola.

El efecto principal de una barrera rompevientos es la reducción de la velocidad del viento. Una buena barrera puede reducir la velocidad del viento hasta en un 80%, a una distancia de hasta 10 veces la altura del árbol a favor del viento y frecuentemente, a una distancia igual a dos veces la altura de los árboles a barlovento. El área en la barrera de sotavento es

conocida como “zona quieta,” un área con forma de cuña con una velocidad del viento muy reducida, con turbulencia moderada y pequeños remolinos. Sobre la zona quieta y a una distancia de varias veces la altura de los árboles a favor del viento, existe una “zona de estela” de extensos remolinos, mayor turbulencia y menor reducción de la velocidad del viento.

Como la barrera rompevientos crea un obstáculo para el viento, la corriente es desviada cuesta arriba cuando se aproxima a la barrera. Cerca de la parte superior de la barrera, la corriente es comprimida y acelerada. A favor del viento e inmediatamente atrás de la barrera, la corriente es casi anulada usando una barrera rompevientos densa, y reducida a una velocidad intermedia con una barrera menos densa o porosa. Existe una zona con vientos de gran velocidad inmediatamente arriba de la barrera rompevientos, esta zona se extiende y sigue la línea de flujo del aire que se mueve hacia abajo; eventualmente se mezcla con el aire en la zona de turbulencia hasta que alcanza su velocidad normal, a una distancia de 20-30 veces la altura de los árboles hacia el sotavento.

La densidad y porosidad de una barrera rompevientos tiene un efecto importante en la distancia so-

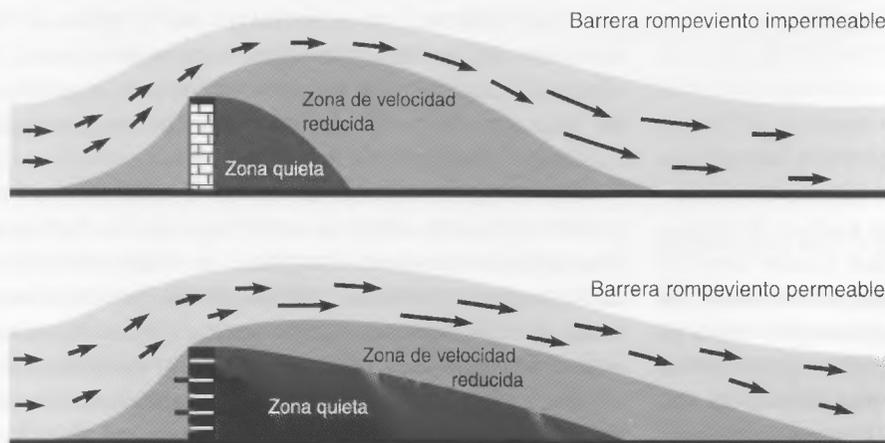


FIGURA 7.7
Descripción de una barrera rompevientos y de un filtro rompevientos. *Un filtro rompevientos (permeable) reduce la velocidad del viento más eficazmente que una barrera rompevientos (impermeable) y lo hace a una gran distancia.*
Adaptado de McNaughton (1988) y Guyot (1989).

bre la cual puede alterar la corriente. Las barreras densas crean mayor reducción de la velocidad, directamente al sotavento, pero tienen una zona mayor donde el viento cambia a mayor velocidad, entre el aire retardado debajo de la barrera y la zona acelerada de arriba. Las barreras densas también crean más turbulencia, porque la pérdida de energía cinética de la corriente original debe ser balanceada incrementando la energía cinética en los remolinos. Esto permite la rápida recuperación de la velocidad del viento debajo de la barrera y por ende, se obtiene una zona de protección pequeña. Se determinó que una barrera con una porosidad del 40%, reduce eficazmente la velocidad del viento a una distancia de 30 veces la altura de los árboles a favor del viento (Tibke 1988).

Además de la reducción de la erosión del suelo, el efecto más tangible de las barreras rompevientos es el incremento de la producción del cultivo. El volumen máximo de cosecha es el beneficio más obvio, pero una reducción del tiempo de cosecha y mejor calidad del producto, también son beneficios importantes. Menos estrés en el sotavento de la barrera permite al cultivo dirigir más energía para el crecimiento reproductivo y vegetativo, y menos al mantenimiento. Se reduce el daño físico, se minimiza la pérdida por transpiración y la temperatura y la humedad elevadas, contribuyen a una mejor cantidad y calidad de la producción.

En un extenso análisis de la investigación sobre los beneficios de las barreras rompevientos, para el campo y los cultivos forrajeros en todo el mundo, Kort (1988) determinó que la mayoría de los cultivos presentan mejores rendimientos cuando crecen en campos con rompevientos, pero que algunos se benefician más que otros. Un cultivo forrajero de hoja ancha como la alfalfa, con un alto porcentaje de pérdida en transpiración de agua por el viento, obtiene mayor beneficio y los granos de ciclo corto como el trigo de primavera y la avena, se benefician menos. Las investigaciones de Kort son presentadas en el Cuadro 7.1.

En un análisis de la influencia de los rompevientos sobre hortalizas y cultivos especializados, Baldwin (1988) in-

CUADRO 7.1 Impactos relativos de barreras rompevientos sobre los rendimientos de cultivos de granos y pasturas varios

Cultivo	Incremento del rendimiento relativo con respecto a plantaciones sin barreras
Alfalfa	99
Mijo	44
Trébol	25
Cebada	25
Arroz	24
Trigo de invierno	23
Centeno	19
Mostaza	13
Maíz	12
Linaza	11
Trigo de primavera	8
Avena	3

Fuente Kort (1988).

formó que existe abundante evidencia que respalda e ilustra los beneficios positivos de la protección contra el viento. El rendimiento aumenta de 5% a 50% en cultivos tales como frijol, remolacha azucarera, tomate, papa, melón, tabaco, moras, cacao, café, algodón, caucho y okra. La mayoría de los beneficios ocurren



FIGURA 7.8

Influencia de la protección de una barrera rompevientos sobre el rendimiento de soja sembrada a diferentes distancias desde la barrera.

Fuente: Baldwin (1984).

hasta una distancia de 10 veces la altura de los árboles, sobre el lado del sotavento, con un beneficio máximo a una distancia entre tres y seis veces la altura de los árboles. También se han visto beneficios a distancias entre cero y tres veces la altura de los árboles a barlovento. En la Figura 7.8 se muestra cómo el rendimiento aumenta según la distancia de la barrera rompevientos. Con este cultivo, el beneficio máximo se obtuvo a cuatro veces la altura de los árboles a sotavento; sin embargo, el rendimiento fue reducido a una distancia de una vez la altura de los árboles, probablemente por la sombra, competencia de la raíz de los árboles o por alelopatía.

En hortalizas y cultivos especializados, el mejoramiento del cultivo es importante en la medida que aumente el rendimiento del mismo. El mejoramiento del cultivo se puede lograr de diferentes formas, incluyendo un aumento en el contenido de azúcar en cultivos como remolacha azucarera y fresas, la resistencia a la abrasión por las ráfagas de arena, en plantaciones de melones y la reducción de los ciclos de producción del cultivo. Ya que las hortalizas y cultivos especializados son muy susceptibles al daño por viento y a su efecto abrasivo, la mejora de la calidad del producto significa mayor rendimiento económico, el cual se añade a las ganancias por el incremento de la producción.

Los rompevientos también ofrecen beneficios considerables a la producción de huertos y viñedos (Norton 1988). La protección para la supervivencia y el desarrollo adecuado de huertos y viñedos es clave durante todo el año. La modificación del microclima de los huertos mediante barreras rompevientos, puede mejorar la polinización y la producción de frutos y a su vez generar grandes rendimientos. El daño mecánico también se reduce, mejorando la calidad de la fruta y el rendimiento económico. El diseño y manejo apropiado de las barreras rompevientos también puede reducir la evaporación y aumentar la flexibilidad de la aplicación de productos para el control de plagas, e incluso son de utilidad para el manejo de heladas. En frutas de climas templados con protección contra el viento como ciruelas, peras y uvas, la producción aumenta entre 10% y 37%; en frutas subtropicales como kiwi, naranjas y limones el incremento es mayor al 30% (además se mejora sustancialmente la calidad de la fruta) y en las frutas tropicales como el banano, los rendimientos se incrementan al menos

15%, debido principalmente a la reducción del acame de los tallos.

Técnicas de Siembra

Los cultivos anuales sembrados en las plantaciones para proteger al cultivo principal del viento, son una alternativa a las barreras rompevientos permanentes hechas de árboles o arbustos. El maíz (*Zea mays*), girasol (*Helianthus annuus*) y una variedad de cultivos de granos como el sorgo (*Sorghum bicolor*) y milo (*Pennisetum americanum*), son ejemplos de plantas anuales usadas para este propósito. Tales barreras de cultivos anuales tienen ciertas ventajas sobre las barreras de árboles, porque son más fáciles, rápidas y baratas de establecer, y permiten más flexibilidad para las operaciones agrícolas.

Tal como las barreras rompevientos, las barreras de plantas anuales reducen la velocidad del viento, aumentando la humedad y las condiciones de temperaturas de las plantas adyacentes. Generalmente, se siembran al mismo tiempo que el cultivo principal, frecuentemente entremezcladas con éste. Otra de las técnicas es sembrar la barrera de plantas (casi siempre de centeno) como cultivo forrajero y después, reducir este cultivo para alternar su corta en primavera, cuando el cultivo principal es cosechado. Las investigaciones han demostrado que una barrera con 40-50% de porosidad es la que ofrece ventajas a los cultivos, y que las plantas que la conforman necesitan ser resistentes al acame; deben situarse de acuerdo con las necesidades de los cultivos adyacentes y las condiciones de los vientos locales, establecidas con anterioridad para proporcionar la protección necesaria. Como la siembra de la barrera de cultivos anuales es parte del proceso de siembra del cultivo principal, esta técnica ofrece mayor flexibilidad al agricultor. La pérdida de tiempo es mínima y el espacio ocupado por la barrera es reducido.

Los girasoles son usados frecuentemente como barreras rompevientos anuales para mejorar las condiciones del cultivo de tomate, brócoli, lechuga y otros cultivos anuales, en áreas ventosas del valle Salinas de California; el maíz se usa frecuentemente para proteger las plantaciones de fresas del efecto abrasivo en las hojas, el daño de la fruta y la reducción de la dispersión de ácaros en zonas costeras del Centro de California. Se ha demostrado que el rendi-

miento de los cultivos anuales como frijol judía y tomate ha mejorado en un 30% con el uso de esas barreras (Bilbro y Fryrear 1988).

Los cultivos se pueden sembrar de forma que resistan mejor el acame y otros daños causados por el viento. Para los cultivos que producen raíces adventicias en la base del tronco, la siembra profunda puede ayudar a asegurar la planta con mayor firmeza en la tierra. Los cultivos de crucíferas como la col de Bruselas, la calabaza y el brócoli se benefician cuando a

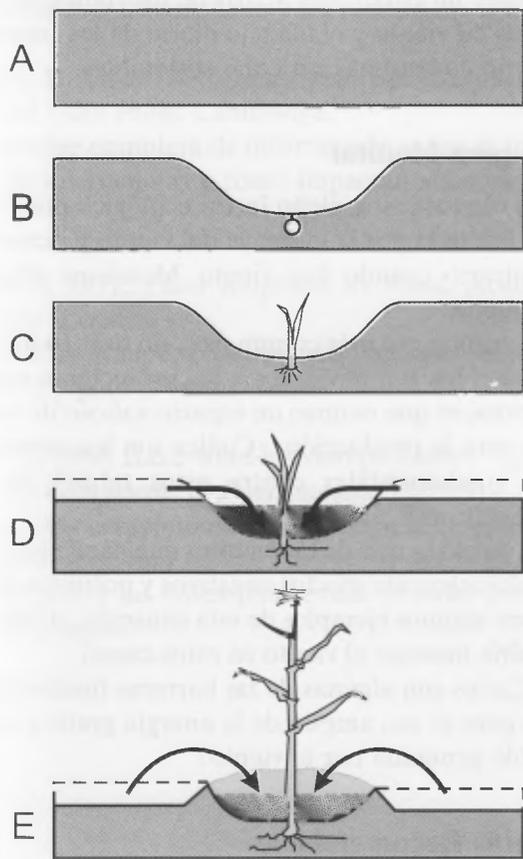


FIGURA 7.9

Montículo para reducir el acame en el maíz. Se siembran las semillas en el fondo del surco (B). Después de un tiempo (C), se llenan los surcos de entre los callejones con tierra (D). Se continúa el aporque con tierra alrededor de las plantas de maíz conforme éstas crecen (E), se crean callejones en relieve en los cuales el maíz está firmemente asegurado. La técnica también tiene la ventaja de recolectar las escasas precipitaciones para la semilla (B) y permitir la eliminación y entierro de las arvenses cuando se remueve la tierra de entre los callejones (D) y (E).

las plántulas trasplantadas, se les cubre con tierra la mayoría de los pedúnculos debajo de los cotiledones, permitiendo a la planta formar más raíces según se van desarrollando. De otro modo, la pequeña plántula con pocas hojas puede ser azotada, como un cometa sobre una cuerda, si está muy expuesta al viento, aunque con el tiempo se mantiene a nivel del suelo.

En las zonas ventosas de México, la semilla del maíz es plantada profundamente en la base del surco, de manera que permita a la planta desarrollarse; el suelo puede agruparse alrededor de la base del tallo como práctica de cultivo para el control de las arvenses. En ese momento el cultivo está casi totalmente desarrollado, las plantas de maíz parecen estar sembradas en la parte superior de la era y por el soporte en el suelo, son mucho más resistentes al acame que ocasionan los fuertes vientos de tormentas convectivas.

Fecha de Siembra

La rotación de cultivos puede ser utilizada para ajustar los sistemas de cultivos a los patrones del viento. Los cultivos sensibles a daños por viento se pueden sembrar durante la temporada de menor presencia de éste (asumiendo que las otras condiciones son adecuadas), seguidos por cultivos tolerantes al viento. Si la erosión eólica es más severa que los daños provocados por el viento en el cultivo, podría ser recomendable no exponer todo el campo al viento. En cambio, una parte del terreno se puede sembrar antes, con un cultivo que sirva como barrera para los cultivos a plantar posteriormente. Otra opción para la prevención de la erosión eólica es sembrar cultivos que dejen pocos residuos en las áreas protegidas y cultivos que produzcan muchos residuos en las zonas más expuestas de la parcela.

Variedades Resistentes a los Efectos del Viento

Una manera útil de prevenir el acame en los cultivos de granos es plantar una variedad de menor altura que la habitual. Por ejemplo, los agricultores del istmo de Tehuantepec en el sudeste de México, han seleccionado un maíz de baja estatura, tallo más grueso y un sistema radicular muy desarrollado, para aquellos lugares donde hay vientos fuertes durante la estación del cultivo. Estas variedades locales son

altamente resistentes al acame. Una de estas variedades, llamada Tuxpan, fue utilizada como una línea genética para el mejoramiento y producción de variedades de maíz durante la Revolución Verde, la cual era más corta, resistentes al acame, con granos más pesados y también más apropiada para ser cosechada por segadoras mecanizadas.

Aprovechamiento del Viento

Hemos discutido principalmente cómo un agricultor puede manipular el viento para aprovechar sus efectos positivos y para reducir los efectos negativos. Pero el viento tiene otros usos dentro de los sistemas agrícolas, que ayudan a contribuir en los grandes objetivos de sostenibilidad. El aprovechamiento de la energía del viento puede ayudar a reducir la entrada de energía y el uso de energía no renovable, especialmente el consumo de combustibles fósiles. Esto tiene mayor importancia en pequeños sistemas agrícolas y para los agricultores de países en desarrollo.

Muchos métodos de aprovechamiento o uso del viento son muy simples, por ejemplo, se puede utilizar para limpiar las semillas de la paja y hojas (polvillo de paja). También se puede usar para el secado. Las plantas de frijol cosechadas se pueden colgar para la trilla, o las frutas como las pasas o el albaricoque pueden extenderse para ser secadas por el viento. Una ligera brisa ayuda considerablemente a eliminar la humedad alrededor de la planta.

Finalmente, el molino de viento se ha usado para aprovechar el poder del viento en un gran número de actividades agrícolas, desde una bomba de agua hasta un generador eléctrico para las operaciones agrícolas de la granja. Las granjas en áreas aisladas, especialmente en países en desarrollo, donde el viento es un factor constante, son las principales candidatas para utilizar el poder del viento.

El Viento y la Sostenibilidad

El viento es un componente importante del clima en todo el mundo. Es también, un factor que frecuentemente tiene impactos dañinos y destructores sobre los agroecosistemas. Para aprender a diseñar agroecosistemas que sean capaces de resistir e incluso reducir los aspectos negativos del viento, habrá que seguir los pasos hacia la sostenibilidad. Pero el paso

más importante podría ser el diseño y manejo de estrategias que aumenten el efecto positivo que el aire en movimiento puede tener en la agricultura. Hasta cierto punto, estos pasos podrían comprender un regreso al uso de las viejas tecnologías, tal como las barreras rompevientos y las hileras de arbustos. No obstante, existe la necesidad de entender las bases ecológicas para usar esas estrategias o prácticas. Solamente entonces se podría desarrollar otro componente medible de la sostenibilidad y así, ayudar a establecer un papel más activo de los rompevientos, turbinas de viento y el manejo diario de los patrones de viento en sistemas agrícolas sostenibles.

Ideas para Meditar

1. En ciertos casos, algún factor ecológico puede estar limitado por la ausencia del viento y ocurrir lo contrario cuando hay viento. Mencione algunos ejemplos.
2. El argumento más común para no usar (o incluso quitar) los rompevientos y los protectores contra vientos, es que ocupan un espacio valioso de terreno para la producción. ¿Cuáles son los argumentos fundamentales contra estos tabúes de los agricultores?
3. El viento es uno de los factores que puede tener simultáneamente efectos negativos y positivos. Mencione algunos ejemplos de esta situación. ¿Cómo se podría manejar el viento en estos casos?
4. ¿Cuáles son algunas de las barreras fundamentales para el uso amplio de la energía gratis y renovable generada por el viento?

Lecturas Recomendadas

Baer, N. W. 1989. Shelterbelts and windbreaks in the Great Plains. *J. Forestry*. 87:32-36.

Un excelente análisis del importante papel ecológico de los árboles en los agroecosistemas de las planicies ventosas de los Estados Unidos.

Brandle, J.R. and D.L Hintz (eds.). 1988. Special Issue: Windbreak Technology. *Agriculture, Ecosystems, & Environment* 22/23:1-598.

Resúmenes de un simposio que reunió a expertos de todo el mundo en diseño y uso de rompevientos en la agricultura.

Caborn, M. 1965. *Shelterbelts and Windbreaks*. Faber and Faber: London

Obra de consulta esencial sobre el papel y manejo de los protectores contra viento y los rompevientos en la agricultura.

Coutts, M. P., and J. Grace. 1995. *Wind and Trees*. Cambridge University Press: New York.

Un análisis completo de los efectos fisiológicos y ecológicos del viento en los árboles y las adaptaciones que éstos han desarrollado para resistirlos.

Geiger, R. 1965. *The Climate near the Ground*. Harvard Univ. Press: Cambridge.

Una fuente completa de información sobre la formación de microclimas y cómo impactan a los seres vivos.

Grace, J. 1977. *Plant Response to Wind*. Academic Press: London

Un análisis completo de las adaptaciones y respuestas de la planta al factor viento.

Lyles, L. 1988. Basic wind erosion processes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 22/23:91-101

Un análisis completo de cómo ocurre la erosión eólica y cuáles son los factores ecológicos que la promueven; presenta las bases para evitar el daño por este tipo de erosión.

Moss, A. E. 1940. Effect of wind-driven SALT water. *J. Forestry* 38:421-425.

Investigación clave que explica cómo la combinación del viento y la sal constituyen un factor importante en el ambiente.

Reifsnnyder, W.S., and T.O. Darnhofer. 1989. *Meteorology and Agroforestry*. Nairobi, Kenya.

Obra de referencia general sobre la energía del viento. Presenta un excelente análisis del importante papel que tienen los árboles en la modificación de los factores y condiciones microclimáticas en la agricultura.

Tibke, G. 1988. Basic principles of wind erosion control. *Agriculture, Ecosystems, & Environment* 22/23:103-122.

Un análisis completo de cómo el hombre puede intervenir para reducir o eliminar la pérdida del suelo causado por el viento.

USDA 1938, *Soils and Men*. U.S. Government Printing Office: Washington, D.C.

Una fuente de referencia clásica sobre las opciones de manejo del suelo, para contrarrestar los problemas de degradación, erosión y pérdida. Incluye algunas opciones para el manejo del suelo, que son aún aplicables en la agricultura actual.

SUELO

El suelo es un complejo, viviente, cambiante y dinámico componente del agroecosistema. Está sujeto a la alteración y puede ser degradado o manejado responsablemente. Gran parte de la agricultura actual, con la disponibilidad de un conjunto de tecnologías mecánicas y químicas que permiten la rápida modificación del suelo, éste es visto, con frecuencia, como algo del cual se extrae una cosecha. Los agricultores a menudo consideran el suelo como algo que les fue concedido y prestan poca atención a los complejos procesos ecológicos que suceden bajo la superficie. En contraste, la premisa de este Capítulo es un detallado entendimiento de la ecología del sistema suelo, lo cual es clave para el diseño y manejo sostenible de los agroecosistemas, en donde se mantiene la fertilidad del suelo a largo plazo.

La palabra suelo, en el sentido más amplio, se refiere a la porción de la corteza terrestre donde las plantas están sostenidas; esto incluye todo, desde los suelos profundos de los lechos de los ríos, hasta una grieta en una roca con pedacitos de polvo y restos de plantas. Más específicamente, el suelo es la capa superficial intemperizada de la Tierra que está mezclada con organismos vivientes y los productos de su actividad metabólica y de su descomposición (Odum 1971). Los suelos incluyen material derivado de las rocas, sustancias orgánicas e inorgánicas derivadas de organismos vivientes, aire y agua que ocupan los espacios entre las partículas del suelo.

Desde una perspectiva agrícola, un suelo "ideal" está compuesto de 45% de minerales, 5% de materia orgánica y 50% de espacio poroso, la mitad del cual está lleno con agua y la otra mitad con aire. Es difícil encontrar algo que podamos llamar un suelo "típico", entonces cada sitio o localidad tiene propiedades únicas, determinadas por el resultado de los procesos de formación del suelo.

PROCESOS DE FORMACIÓN Y DESARROLLO DEL SUELO

Los procesos biológicos combinados con los procesos físicos y químicos en cada lugar y región climática forman el suelo. Una vez formados, los suelos cambian y se desarrollan debido a éstos y otros procesos biológicos, físicos y químicos. Con variaciones en la pendiente, clima y tipos de cubierta vegetal, muchos suelos diferentes pueden formarse en yuxtaposición cercana con cualquier otro, aunque el material parental puede ser bastante similar.

Los procesos naturales de formación y desarrollo del suelo toman un tiempo considerable. Por ejemplo, se estima que aproximadamente sólo 0,5 toneladas de suelo superficial por acre (1 acre = 0,5 ha) se forma anualmente en áreas de producción de maíz y trigo, en la región central del medio oeste de Estados Unidos. En contraste, se estima que alrededor de cinco a seis toneladas de suelo por acre de tierras convencionalmente agrícolas en esas áreas son erosionadas, con pérdidas de suelo que a menudo exceden 15 - 20 toneladas por acre en algunos años (Jackson 1980).

Formación de Regolita

En conjunto, la capa o manto de material no consolidado entre la superficie del suelo y la roca sólida de la Tierra es llamada **regolita**. El elemento básico de la regolita es su componente mineral, constituido por partículas de suelo formadas por el rompimiento interior de la roca madre o material parental. En cualquier lugar, esas partículas del suelo pueden haber sido derivadas de la roca madre, o transportadas desde otra parte. Donde las partículas minerales del suelo han sido formadas a partir de la roca madre de ese lugar, el suelo es un **suelo residual**. En el lugar donde

SUELO

El suelo es un complejo, viviente, cambiante y dinámico componente del agroecosistema. Está sujeto a la alteración y puede ser degradado o manejado responsablemente. Gran parte de la agricultura actual, con la disponibilidad de un conjunto de tecnologías mecánicas y químicas que permiten la rápida modificación del suelo, éste es visto, con frecuencia, como algo del cual se extrae una cosecha. Los agricultores a menudo consideran el suelo como algo que les fue concedido y prestan poca atención a los complejos procesos ecológicos que suceden bajo la superficie. En contraste, la premisa de este Capítulo es un detallado entendimiento de la ecología del sistema suelo, lo cual es clave para el diseño y manejo sostenible de los agroecosistemas, en donde se mantiene la fertilidad del suelo a largo plazo.

La palabra suelo, en el sentido más amplio, se refiere a la porción de la corteza terrestre donde las plantas están sostenidas; esto incluye todo, desde los suelos profundos de los lechos de los ríos, hasta una grieta en una roca con pedacitos de polvo y restos de plantas. Más específicamente, el suelo es la capa superficial intemperizada de la Tierra que está mezclada con organismos vivientes y los productos de su actividad metabólica y de su descomposición (Odum 1971). Los suelos incluyen material derivado de las rocas, sustancias orgánicas e inorgánicas derivadas de organismos vivientes, aire y agua que ocupan los espacios entre las partículas del suelo.

Desde una perspectiva agrícola, un suelo "ideal" está compuesto de 45% de minerales, 5% de materia orgánica y 50% de espacio poroso, la mitad del cual está lleno con agua y la otra mitad con aire. Es difícil encontrar algo que podamos llamar un suelo "típico", entonces cada sitio o localidad tiene propiedades únicas, determinadas por el resultado de los procesos de formación del suelo.

PROCESOS DE FORMACIÓN Y DESARROLLO DEL SUELO

Los procesos biológicos combinados con los procesos físicos y químicos en cada lugar y región climática forman el suelo. Una vez formados, los suelos cambian y se desarrollan debido a éstos y otros procesos biológicos, físicos y químicos. Con variaciones en la pendiente, clima y tipos de cubierta vegetal, muchos suelos diferentes pueden formarse en yuxtaposición cercana con cualquier otro, aunque el material parental puede ser bastante similar.

Los procesos naturales de formación y desarrollo del suelo toman un tiempo considerable. Por ejemplo, se estima que aproximadamente sólo 0,5 toneladas de suelo superficial por acre (1 acre = 0,5 ha) se forma anualmente en áreas de producción de maíz y trigo, en la región central del medio oeste de Estados Unidos. En contraste, se estima que alrededor de cinco a seis toneladas de suelo por acre de tierras convencionalmente agrícolas en esas áreas son erosionadas, con pérdidas de suelo que a menudo exceden 15 - 20 toneladas por acre en algunos años (Jackson 1980).

Formación de Regolita

En conjunto, la capa o manto de material no consolidado entre la superficie del suelo y la roca sólida de la Tierra es llamada **regolita**. El elemento básico de la regolita es su componente mineral, constituido por partículas de suelo formadas por el rompimiento interior de la roca madre o material parental. En cualquier lugar, esas partículas del suelo pueden haber sido derivadas de la roca madre, o transportadas desde otra parte. Donde las partículas minerales del suelo han sido formadas a partir de la roca madre de ese lugar, el suelo es un **suelo residual**. En el lugar donde

las partículas minerales han sido transportadas desde algún otro lugar por viento, agua, gravedad o hielo, el suelo es un **suelo transportado**.

Intemperismo Físico

El intemperismo de las rocas y los minerales de ésta son la fuente de las partículas minerales del suelo, tanto si las partículas permanecen en ese lugar o son transportadas a otro lugar. Las fuerzas combinadas del agua, viento, temperatura y gravedad, lentamente despegan y desprenden partículas de roca, uniéndose a la descomposición gradual de los minerales. El agua puede filtrarse dentro de las grietas y ranuras de la roca y por calentamiento y enfriamiento, causar alternativamente contracciones y expansiones en forma alterna, lo que provoca que la roca se empiece a fragmentar. Además, el dióxido de carbono contenido en el agua que se filtra por las grietas puede formar ácido carbónico, tomando elementos tales como calcio y magnesio de los minerales de la roca y formando carbonatos, que en el proceso debilitan la estructura cristalina de la roca, haciéndola más susceptible a nuevo intemperismo físico. Las partículas finas se mezclan con las partículas grandes originadas por el movimiento físico producto de las fuerzas combinadas de la gravedad, cambios de temperatura y alternancia de humedecimiento y secado. Entonces, la fuerza abrasiva de las rocas al chocar unas con otras forman partículas más pequeñas. Eventualmente la regolita no consolidada toma forma.

Dependiendo de las condiciones locales e historia geológica, la regolita puede ser de reciente formación, con poca intemperización y formada principalmente de minerales primarios, o puede haber estado sujeta a intemperización intensiva y estar compuesta de materiales muy resistentes tales como el cuarzo.

Transporte

Como la roca se rompe en partículas pequeñas y sueltas, pueden permanecer en el lugar y eventualmente formar suelos residuales, pero su destino probable es ser transportado y depositado en otro lugar. Las fuerzas del viento, movimiento del agua, gravedad y deshielo pueden transportar partículas de suelo intemperizadas. Los suelos transportados tienen diferentes clasificaciones dependiendo de la manera en

que sus partículas fueron transportadas. El suelo es llamado:

- **coluvial** si fue transportado por gravedad;
- **aluvión** si fue transportado por el movimiento del agua;
- **glacial** si fue transportado por el movimiento de glaciares;
- **eólico** si fue transportado por el viento.

Procesos Bióticos

Tarde o temprano, dependiendo de la consistencia de la regolita, las plantas se establecen sobre el material intemperizado. Las raíces de las plantas toman nutrientes de la materia mineral, los almacenan temporalmente en su materia, pero eventualmente los regresan a la superficie del suelo. Las raíces más profundas penetran debajo de la regolita, capturan nutrientes que han sido lavados de la parte superior de la superficie y los adicionan a la superficie del suelo en forma orgánica. Los residuos de las plantas sirven entonces como fuente importante de energía para las bacterias, hongos, lombrices y otros organismos del suelo.

La materia orgánica es descompuesta a una forma simple mediante la descomposición y mineralización. Los macroorganismos en el suelo —ciempiés, milpiés, lombrices, ácaros, saltamontes y otros— consumen material fresco de plantas y lo convierten en material parcialmente descompuesto, tanto en forma de excreta como por su propio cuerpo muerto. Este material es entonces descompuesto aún más por microorganismos, principalmente bacterias y hongos, que lo convierten en un conjunto de compuestos tales como carbohidratos, ligninas, grasas, resinas, ceras y proteínas. La mineralización eventualmente rompe estos compuestos complejos en productos simples tales como dióxido de carbono, agua, sales y minerales.

La fracción de la materia orgánica residual en el suelo, como resultado de la descomposición y mineralización, es llamada **humus**. Tiene un cierto tiempo de vida en el suelo, después del cual es descompuesto. No obstante, el humus viejo es constantemente reemplazado por humus nuevo y el punto de equilibrio entre los dos es un factor importante en el manejo del suelo.

Intemperización Química

Mientras la regolita se está formando y los organismos vivos comienzan a tener efecto sobre ella, también ocurre la intemperización química. Esta incluye procesos químicos naturales que ayudan en la descomposición de los materiales parentales, en la conversión de materiales en el suelo de una forma a otra y en el movimiento de materiales en el suelo. Cuatro procesos químicos diferentes tienen especial importancia en la formación y desarrollo del suelo: hidratación, hidrólisis, solución y oxidación.

La **hidratación** es la adición de moléculas de agua a la estructura química de los minerales. Es una causa importante de dilatación y fractura de los cristales. La **hidrólisis** ocurre cuando varios cationes de la estructura cristalina original de minerales de silicato, son reemplazados por iones de hidrógeno causando descomposición. En regolitas con pH bajo, la mayor concentración de iones H^+ acelera la hidrólisis. La liberación de ácidos orgánicos como producto de las actividades metabólicas de los organismos vivos o de la descomposición de la materia orgánica muerta, también se suma a este proceso. La **solución** ocurre cuando materiales parentales con alta concentración de minerales fácilmente solubles (tales como los nitratos o cloratos) forman una solución con el agua. La piedra caliza es particularmente susceptible a la solución, en presencia de agua con alto contenido de ácido carbónico; en casos extremos la disolución de calizas provoca la formación de cuevas en áreas con flujo de agua subterránea. Finalmente, la **oxidación** es la conversión de elementos tales como el hierro, de su forma original reducida a forma oxidada en presencia de agua o aire. El ablandamiento de la estructura cristalina usualmente acompaña este proceso.

Una vez que los minerales son liberados del material parental consolidado, ocurre otro proceso químico que es de gran importancia, es la formación de minerales secundarios, siendo los más importantes los minerales de arcilla. La mineralogía de la arcilla es un campo de estudio complejo, pero es importante entender algunos aspectos básicos de su formación, ya que tienen un efecto muy importante sobre el crecimiento y desarrollo de la planta.

Los minerales de arcilla son partículas muy pequeñas en el suelo, pero afectan toda la disponibili-

dad de nutrimentos retenidos en el agua, como será discutido más adelante. Ellos son formados por procesos complejos en los cuales los minerales de silicato son químicamente modificados y reorganizados. Dependiendo de la combinación de las condiciones climáticas y del material parental, los minerales secundarios formados son de dos tipos básicos: **silicatos de arcillas**, que están formados predominantemente de revestimientos microscópicos de silicatos de aluminio, con diferentes arreglos y la presencia o ausencia de otros elementos tales como hierro y magnesio; e **hidróxidos de arcillas** que carecen de una estructura cristalina definitiva y están compuestos de hierro hidratado y óxidos de aluminio, en los cuales muchos de los iones de silicato han sido reemplazados.

Eventualmente, las arcillas encontradas en cualquier suelo pueden ser una mezcla de muchos subtipos de esos dos tipos básicos, aunque uno o unos pocos subtipos pueden predominar. Cuando hay mayoría de silicatos de arcilla, hay sitios abundantes para la absorción de cationes, dándole al suelo una productividad potencial relativamente alta. Cuando existen principalmente arcillas de hidróxido—como en muchas regiones tropicales húmedas—hay pocos sitios para cationes, haciendo que el suelo sea más difícil de trabajar por su poca capacidad para intercambiar cationes.

La materia orgánica, tanto de residuos de plantas como de las actividades de organismos vivos, tiene un efecto importante sobre todos estos procesos de intemperización química del material parental y acelera significativamente la formación de la regolita. No obstante, el conjunto de interacciones biológicas y químicas que actúan sobre las rocas y minerales, los convierten en partículas pequeñas de suelo, los que tienen gran interés para la agricultura.

HORIZONTES DEL SUELO

A través del tiempo, los procesos biológicos, físicos y químicos que existen en la regolita conducen al desarrollo de capas observables en el suelo, llamadas **horizontes**. En conjunto los horizontes, en un sitio en particular, dan a cada suelo un **perfil del suelo** distintivo. Cada horizonte en el perfil del suelo tiene una combinación de características distintivas.

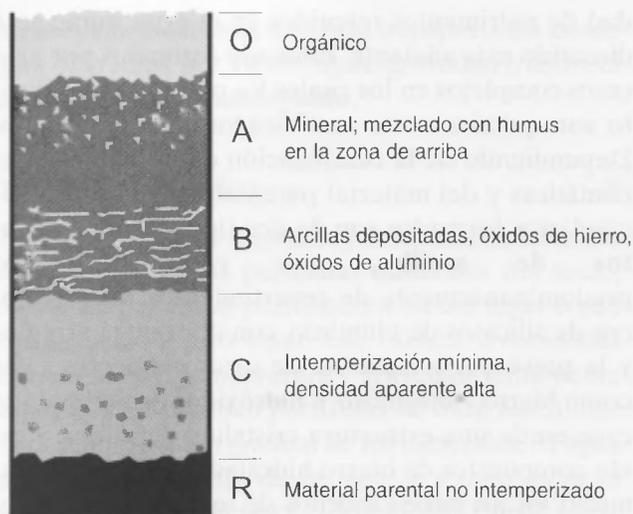


FIGURA 8.1
Generalización de un perfil de suelo.

Perfil del Suelo

En términos generales, un perfil de suelo está compuesto de cuatro horizontes principales: el orgánico u horizonte O y tres horizontes minerales. El horizonte O se encuentra sobre la superficie del suelo; inmediatamente debajo está el horizonte A, donde la materia orgánica se acumula. En esta estructura las partículas del suelo pueden ser granular, grumosa o laminar. Debajo del horizonte A está el horizonte B, donde los materiales lixiviados del horizonte A pueden acumularse en forma de silicatos, arcilla, hierro, aluminio o

humus y la estructura del suelo puede ser en bloques, prismática o columnar. Finalmente está el horizonte C, compuesto de material parental intemperizado, derivado tanto del material parental local del subsuelo como del material transportado recientemente a ese lugar. Algunos materiales lixiviados o depositados en los horizontes A y B, tales como carbonatos de calcio y magnesio, pueden encontrarse aquí, especialmente en áreas con poca lluvia. Dependiendo de la profundidad de los cuatro horizontes superiores, un horizonte R, formado de roca consolidada, puede ser incluido también como parte del perfil del suelo.

Debido a que las separaciones entre cada horizonte son pocas veces diferenciadas, los horizontes descritos arriba forman un continuo en el perfil del suelo. En la Figura 8.1 se presenta un esquema del perfil típico del suelo. La profundidad, características y diferenciación de cada horizonte en cada perfil de suelo, es el resultado de los efectos combinados de las propiedades del material del suelo (su color, contenido de materia orgánica y características físicas y químicas), el tipo de cobertura vegetal y el clima.

Los procesos que conducen a la diferenciación de los horizontes funcionan de diferentes maneras, dependiendo de las condiciones locales y regionales. Estas diferencias resultan en cuatro tipos básicos de desarrollo del suelo, los cuales son resumidos en el Cuadro 8.1. El proceso de calcificación es más característico de áreas con vegetación de pastizales, en climas templados, hasta tropicales y desde subhúmedos

CUADRO 8.1 Cuatro tipos de desarrollo del suelo

Procesos de desarrollo	Humedad	Temperatura	Vegetación típica	Características resultantes
Gleización	Alta	Fría	Tundra	Horizontes compactados, poca actividad biológica
Podzolización	Alta	Fresca a cálida	Bosque espinoso, bosque deciduo	Horizonte A con colores claros, horizonte B amarillo-pardo, alto en hierro y aluminio
Laterización	Alta	Tibia a caliente	Bosque tropical lluvioso	Intemperizado a gran profundidad; horizontes no diferenciados, bajo en nutrientes para las plantas
Calcificación	Baja	Fresca a caliente	Pradera, estepa, desierto	Horizonte A espeso, rico en calcio, nitrógeno y materia orgánica (excepto en desiertos)

hasta áridos en el mundo. La podzolización es sobre todo característica en áreas húmedas templadas, donde los bosques han sido la cobertura vegetal dominante por un largo tiempo. La laterización tiene lugar sobre suelos fuertemente intemperizados y viejos, de las regiones forestales húmedas tropicales y subtropicales y, la gleización es más común en suelos donde el agua permanece en o cerca de la superficie por una buena parte del año. Sin embargo, dependiendo de las condiciones locales, de la pendiente, drenaje, vegetación, profundidad del lecho rocoso, etc., se pueden encontrar combinaciones de estos procesos. En general, la formación y desarrollo del suelo es un proceso ecológico, donde el suelo afecta la vegetación y la vegetación afecta el suelo.

Importancia del Horizonte Orgánico

En ecosistemas naturales, el horizonte O es la parte biológica más activa del perfil y la más importante ecológicamente. Esta tiene un papel significativo en la vida y distribución de plantas y animales, en la conservación de la fertilidad del suelo y en muchos procesos de desarrollo de éste. Los macro y microorganismos responsables de la descomposición son más activos en esta capa y en la parte superior del horizonte A. Usualmente, el horizonte O es muy reducido o no existe en suelos cultivados.

La combinación del clima local y los tipos de vegetación contribuyen a las condiciones que estimulan la actividad en esta capa; al mismo tiempo, la calidad de la capa tiene una profunda influencia sobre el tipo de organismos que viven en ella. Las bacterias, por ejemplo, prefieren condiciones casi neutras o ligeramente alcalinas, mientras que los hongos prefieren condiciones más ácidas. Los ácaros y colémbolos se desarrollan mejor bajo condiciones ácidas, mientras que las lombrices y las termitas tienden a predominar en los neutros o más alcalinos.

El proceso complejo de la agregación de las partículas del suelo, el cual crea lo que se conoce como la estructura grumosa del suelo, está muy influenciado por el humus formado durante la descomposición de la capa orgánica del suelo. Además, muchos procesos importantes de la fertilidad del suelo, discutidos más adelante en este Capítulo, están estrechamente relacionados con las características ecológicas de esta importante capa.

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Para desarrollar y mantener un sistema de suelo saludable, así como para tener una opinión sólida sobre las estrategias específicas para el manejo del suelo, es importante entender algunas de las propiedades más esenciales de los suelos y cómo éstas afectan la respuesta del cultivo.

Textura

La textura del suelo es definida como el porcentaje, por peso, del total de suelo mineral que corresponde a varias clases de tamaños de partículas. Esas clases de tamaño son: grava, arena, limo y arcilla (Cuadro 8.2). Las partículas mayores de 2,0 mm de diámetro están clasificadas como grava. La arena es fácilmente visible a simple vista y se siente como "rasposo" cuando se frota y resbala entre los dedos. Su baja relación volumen-superficie la hace porosa al agua y tiene poca capacidad para absorber y retener cationes nutritivos. El limo es más fino que la arena, es granuloso en apariencia y al tacto, y retiene mejor el agua y los iones nutritivos. Las partículas de arcilla son difíciles de ver a simple vista separadas unas de otras, y su apariencia al tacto es como de polvo. Las partículas de arcilla, que deben verse en microscopio, son coloidales, por lo cual pueden formar una suspensión en agua y son sitios activos para la adhesión de iones nutritivos o moléculas de agua. Como resultado, las arcillas controlan las propiedades más importantes del suelo, incluyendo la plasticidad e intercambio de iones entre las partículas del suelo y el agua presente en el suelo. No obstante, un suelo con alto contenido de arcilla, puede tener problemas con el drenaje del agua y cuando se seca presenta grietas.

CUADRO 8.2 Clasificación de texturas de suelos

Categoría	Intervalos de diámetros* (mm)
Arena muy gruesa	2,00 – 1,00
Arena gruesa	1,00 – 0,50
Arena media	0,50 – 0,25
Arena fina	0,25 – 0,10
Arena muy fina	0,10 – 0,05
Limo	0,05 – 0,002
Arcilla	< 0,002

* Escala del Departamento de Agricultura de Estados Unidos de Norteamérica

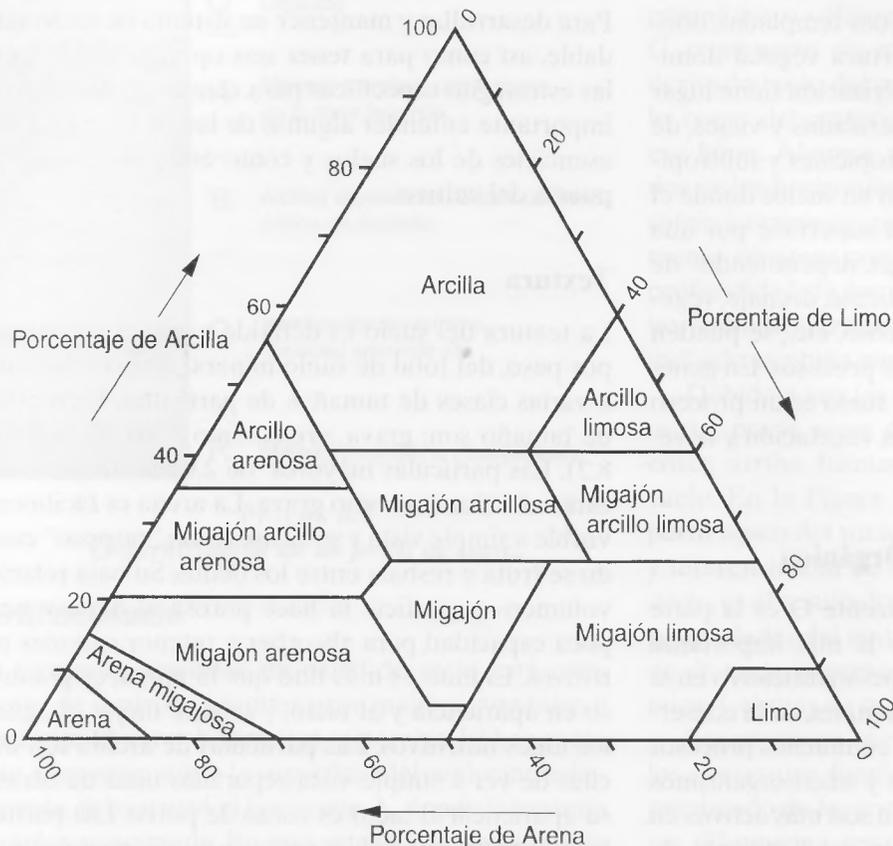


FIGURA 8.2

Nombres de las texturas del suelo. El mejor tipo de suelo está determinado por el cultivo y las condiciones locales, generalmente; no obstante, los suelos que contienen cantidades relativamente iguales de arcilla, arena y limo – llamados migajones – son mejores para propósitos agrícolas. Diagrama de USDA.

La mayoría de los suelos son una mezcla de clases de texturas y con base en el porcentaje de cada clase, son llamados como se muestra en la Figura 8.2. Desde una perspectiva agrícola, la arena proporciona al suelo un buen drenaje y contribuye a facilitar el cultivo, pero un suelo arenoso también se seca fácilmente y pierde nutrientes por lixiviación. La arcilla, por el contrario, tiende a no tener buen drenaje y puede llegar fácilmente a compactarse y dificultar el trabajo, sin embargo, es buena para retener la humedad y los nutrientes.

El que la textura de un suelo sea buena depende de los cultivos que se estén desarrollando en él. Por ejemplo, las papas crecen mejor en suelos arenosos,

bien drenados, lo cual les ayuda a prevenir el rompimiento de tubérculos y facilitar la cosecha. El arroz palay se desarrolla mejor en suelos pesados, con gran contenido de arcilla, debido a las adaptaciones del cultivo a ambientes húmedos. En general, un suelo franco arcilloso puede ser mejor sobre todo en ambientes secos, mientras que un franco arenoso es mejor en ambientes húmedos. La adición de materia orgánica cambia las relaciones de las partículas en mezclas, como se discutirá más adelante.

Estructura

Además de los aspectos descritos sobre la textura, el suelo posee una macro estructura formada por la manera en que las partículas individuales están cohesionadas en agrupamientos de diferentes formas y tamaños llamados agregados (Figura 8.3). Los agregados del suelo tienden a ser más grandes al incrementarse la profundi-

dad en el suelo. La textura del suelo es uno de los factores más importantes que determinan la estructura, pero la estructura usualmente depende más de los contenidos de materia orgánica del suelo, de las plantas que crecen en él, de la presencia de organismos del suelo y del estado químico del mismo. Las estructuras tipo grumosa o granular son las mejores para la agricultura, ya que una buena “estructura grumosa” mejora la porosidad del suelo y facilita la labranza, en conjunto forman lo que se llama capa de **labranza**. Cuando un terrón de suelo es triturado con las manos y se rompe fácilmente en estructura granular o grumosa, tal como se muestra en la Figura 8.3, una buena estructura grumosa está presente.

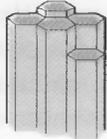
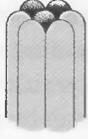
<p>Laminar</p> 		<p>Prismática</p> 		<p>Columnar</p> 	
<p>Puede ocurrir en cualquier horizonte</p>		<p>Es común en subsuelos de regiones áridas o semiáridas</p>			
<p>Bloques</p> 		<p>Bloques (Subangulares)</p> 		<p>Granular</p> 	
<p>Es común en subsuelos pesados de regiones húmedas</p>		<p>Es característica de suelos superficiales con buena labranza</p>			

FIGURA 8.3
Patrones de agregación de suelo.
 Modificado de Brady y Weil (1996).

Desde una perspectiva agroecológica, una buena estructura grumosa tiene gran importancia. Las partículas de suelo que están cohesionadas resisten la erosión del viento y del agua, durante cualquier época del año, cuando la cobertura vegetal es mínima. La buena estructura también ayuda a mantener baja la **densidad aparente**, definida como el peso de los sólidos por unidad de volumen del suelo. Un suelo con una baja densidad aparente tiene un elevado porcentaje de espacio poroso (alta porosidad), mayor aireación, mejor percolación del agua (permeabilidad) y mayor capacidad de almacenamiento de agua. Obviamente, un suelo de este tipo es más fácil de labrar y permite a las raíces de las plantas penetrar con más facilidad. El cultivo excesivo acelera el agotamiento de la materia orgánica del suelo e incrementa el potencial de compactación, causando que la densidad aparente se incremente y muchas de las ventajas de la buena estructura grumosa se pierdan.

La formación de agregados del suelo tiene esencialmente dos componentes: La atracción entre partículas individuales de suelo, cuyo grado depende de la textura del suelo, y la unión de estos grupos de partículas por la materia orgánica. El primer componente no puede ser fácilmente manipulado por el agricultor, al menos de manera práctica, pero el segundo es

afectado por las prácticas agrícolas. Así, la estructura en grumos puede mantenerse, perderse o mejorarse.

Por ejemplo, la labranza excesiva con equipo pesado cuando el suelo está demasiado húmedo, puede provocar la formación de grandes terrones que se secan sobre la superficie y después son muy difíciles de deshacer. La compactación, o la pérdida del espacio poroso y el incremento de la densidad aparente, es un indicativo de la pérdida de la estructura de grumos y puede ser causada por el peso de la maquinaria agrícola, por la pérdida de la materia orgánica por labranza excesiva o por la combinación de estos dos factores.

Color

El color del suelo tiene un papel más importante en la identificación de los tipos de suelos, pero al mismo tiempo puede decirnos mucho sobre la historia del manejo y desarrollo del suelo. Los colores oscuros generalmente son una indicación de altos contenidos de materia orgánica, especialmente en regiones templadas. Los suelos rojos y amarillos, generalmente indican altos niveles de óxido de hierro, formados bajo condiciones de buena aireación y drenaje, pero estos colores también pueden deberse al material parental. Los colores grises o pardo amarillentos pueden ser indicadores de drenaje pobre, estos colores se forman cuando el hierro es reducido a formas ferrosas más que a la oxidación de formas férricas por presencia de abundante oxígeno. Los colores blancuzcos o claros frecuentemente indican la presencia de cuarzo, carbonatos o yeso. Para determinar el color del suelo se utilizan cartas estandarizadas de colores.

Por consiguiente, el color del suelo puede ser un indicador de cierta clase de condición de éste, lo que un agricultor puede querer conservar o evitar, dependiendo de la clase de cultivo o sistema de cultivos que podrían plantarse. Se requieren análisis más específicos de química y estructura del suelo para completar

el panorama, pero el color es un buen comienzo. Además, el color del suelo puede influenciar la interacción del suelo con otros factores del ambiente. Por ejemplo, puede ser una ventaja tener suelos arenosos de colores claros sobre la superficie en algunos sistemas agrícolas tropicales, para reflejar los rayos del sol y conservar el suelo más fresco; por el contrario, una superficie oscura en áreas con inviernos fríos ayudaría a que la temperatura del suelo se elevara más tempranamente en la primavera, secando el suelo rápidamente y permitiendo su preparación para siembras más tempranas.

Capacidad de Intercambio Catiónico

Las plantas obtienen los nutrientes minerales (descritos en los Capítulos 2 y 3) del suelo en la forma de iones disueltos, cuya solubilidad es determinada por la atracción electrostática de las moléculas del agua. Algunos nutrientes minerales importantes, tales como el potasio y el calcio, están en forma de iones positivos; otros, como los nitratos y los fosfatos, están en forma de iones negativos. Si estos iones disueltos no son absorbidos inmediatamente por las raíces de las plantas o por los hongos, corren el riesgo de ser lavados fuera de la solución del suelo.

Las partículas de arcilla y humus, separadas o en conjunto, forman estructuras como láminas conocidas como micelas, las cuales tienen superficies con carga negativa y atraen a los iones positivos que son más pequeños y móviles. La cantidad de sitios disponibles en las micelas para enlazar iones positivos (cationes) determina lo que se llama **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** del suelo, la cual es medida en miliequivalentes de cationes por 100 g de suelo seco o bien, más recientemente, en cmol (+) kg^{-1} de suelo. Entre más alta sea la CIC más capacidad tiene el suelo para retener e intercambiar cationes, previniendo la lixiviación de nutrientes y permitiendo a las plantas tener una adecuada nutrición.

La capacidad de intercambio de cationes varía de suelo a suelo, dependiendo de la estructura del complejo arcilla/humus, del tipo de micela presente y de la cantidad de materia orgánica incorporada en el suelo. Los poliedros multifacéticos forman látices que varían en cuanto a sus sitios de atracción y flexibilidad, dependiendo de los contenidos de humedad. Los cationes se pegan a las superficies externas de las mi-

celas y humatos con carga negativa, con diferentes grados de atracción. Los cationes más aferrados - tal como los iones de hidrógeno adicionados por la lluvia, los ácidos con carga positiva de la descomposición de la materia orgánica, y los ácidos excretados por el metabolismo de las raíces - pueden desplazar a otros importantes nutrientes catiónicos tales como el K^+ o Ca^{2+} . La materia orgánica en forma de humus es varias veces más efectiva que la arcilla para incrementar la CIC, ya que posee una superficie más extensa en cuanto a la relación área/volumen (por lo tanto más sitios de adsorción) y porque su naturaleza es coloidal. Las prácticas agrícolas que reducen los contenidos de materia orgánica pueden reducir también este importante componente para el mantenimiento de la fertilidad del suelo.

Los iones negativos, que son importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas, tales como los nitratos, fosfatos y sulfatos, están comúnmente absorbidos a las micelas de las arcillas mediante los iones "puentes". En condiciones de acidez estos puentes se forman por la asociación de iones hidrógeno, con grupos funcionales tales como los grupos hidroxilo (OH). Un ejemplo importante es el enlace de nitrato (NO_3^-) con OH_2^+ , formado a partir de la disociación de moléculas de agua bajo condiciones ácidas. Debido a que la acidez del suelo influye la carga eléctrica de la superficie micelar y controla si otros iones son desplazados de las micelas del suelo, esto afecta mucho la retención de iones en el suelo y en poco tiempo, la disponibilidad de nutrientes, por lo que ambos son componentes claves de la fertilidad del suelo.

Acidez del Suelo y pH

Cualquier agricultor o jardinero experimentado está enterado de la importancia del pH del suelo, o del balance ácido - base. El rango típico de pH de los suelos se encuentra entre muy ácido (a pH de 3) y fuertemente alcalino (a pH de 8). Cualquier suelo cercano a un pH de 7 (neutral), es considerado básico y aquellos que tienen pH menor a 6,6 son considerados ácidos. Pocas plantas, especialmente cultivos agrícolas, se desarrollan bien fuera del rango del pH de 5 a 8. Las leguminosas son particularmente sensibles a pH bajos, debido al impacto que tiene la acidez del suelo sobre los microbios simbioses en la fijación

el panorama, pero el color es un buen comienzo. Además, el color del suelo puede influenciar la interacción del suelo con otros factores del ambiente. Por ejemplo, puede ser una ventaja tener suelos arenosos de colores claros sobre la superficie en algunos sistemas agrícolas tropicales, para reflejar los rayos del sol y conservar el suelo más fresco; por el contrario, una superficie oscura en áreas con inviernos fríos ayudaría a que la temperatura del suelo se elevara más tempranamente en la primavera, secando el suelo rápidamente y permitiendo su preparación para siembras más tempranas.

Capacidad de Intercambio Catiónico

Las plantas obtienen los nutrientes minerales (descritos en los Capítulos 2 y 3) del suelo en la forma de iones disueltos, cuya solubilidad es determinada por la atracción electrostática de las moléculas del agua. Algunos nutrientes minerales importantes, tales como el potasio y el calcio, están en forma de iones positivos; otros, como los nitratos y los fosfatos, están en forma de iones negativos. Si estos iones disueltos no son absorbidos inmediatamente por las raíces de las plantas o por los hongos, corren el riesgo de ser lavados fuera de la solución del suelo.

Las partículas de arcilla y humus, separadas o en conjunto, forman estructuras como láminas conocidas como micelas, las cuales tienen superficies con carga negativa y atraen a los iones positivos que son más pequeños y móviles. La cantidad de sitios disponibles en las micelas para enlazar iones positivos (cationes) determina lo que se llama **capacidad de intercambio catiónico** (CIC) del suelo, la cual es medida en miliequivalentes de cationes por 100 g de suelo seco o bien, más recientemente, en cmol (+) kg^{-1} de suelo. Entre más alta sea la CIC más capacidad tiene el suelo para retener e intercambiar cationes, previniendo la lixiviación de nutrientes y permitiendo a las plantas tener una adecuada nutrición.

La capacidad de intercambio de cationes varía de suelo a suelo, dependiendo de la estructura del complejo arcilla/humus, del tipo de micela presente y de la cantidad de materia orgánica incorporada en el suelo. Los poliedros multifacéticos forman látices que varían en cuanto a sus sitios de atracción y flexibilidad, dependiendo de los contenidos de humedad. Los cationes se pegan a las superficies externas de las mi-

celas y humatos con carga negativa, con diferentes grados de atracción. Los cationes más aferrados - tal como los iones de hidrógeno adicionados por la lluvia, los ácidos con carga positiva de la descomposición de la materia orgánica, y los ácidos excretados por el metabolismo de las raíces - pueden desplazar a otros importantes nutrientes catiónicos tales como el K^+ o Ca^{2+} . La materia orgánica en forma de humus es varias veces más efectiva que la arcilla para incrementar la CIC, ya que posee una superficie más extensa en cuanto a la relación área/volumen (por lo tanto más sitios de adsorción) y porque su naturaleza es coloidal. Las prácticas agrícolas que reducen los contenidos de materia orgánica pueden reducir también este importante componente para el mantenimiento de la fertilidad del suelo.

Los iones negativos, que son importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas, tales como los nitratos, fosfatos y sulfatos, están comúnmente absorbidos a las micelas de las arcillas mediante los iones "puentes". En condiciones de acidez estos puentes se forman por la asociación de iones hidrógeno, con grupos funcionales tales como los grupos hidroxilo (OH). Un ejemplo importante es el enlace de nitrato (NO_3^-) con OH_2^+ , formado a partir de la disociación de moléculas de agua bajo condiciones ácidas. Debido a que la acidez del suelo influye la carga eléctrica de la superficie micelar y controla si otros iones son desplazados de las micelas del suelo, esto afecta mucho la retención de iones en el suelo y en poco tiempo, la disponibilidad de nutrientes, por lo que ambos son componentes claves de la fertilidad del suelo.

Acidez del Suelo y pH

Cualquier agricultor o jardinero experimentado está enterado de la importancia del pH del suelo, o del balance ácido - base. El rango típico de pH de los suelos se encuentra entre muy ácido (a pH de 3) y fuertemente alcalino (a pH de 8). Cualquier suelo cercano a un pH de 7 (neutral), es considerado básico y aquellos que tienen pH menor a 6,6 son considerados ácidos. Pocas plantas, especialmente cultivos agrícolas, se desarrollan bien fuera del rango del pH de 5 a 8. Las leguminosas son particularmente sensibles a pH bajos, debido al impacto que tiene la acidez del suelo sobre los microbios simbiotes en la fijación

del nitrógeno. Las bacterias, en general, son afectadas negativamente por pH bajos. La acidez del suelo es bien conocida por sus efectos sobre la disponibilidad de nutrimentos, sin embargo, estos efectos no son tanto debido a la toxicidad directa sobre la planta sino más bien a la dificultad de la planta para absorber nutrimentos específicos tanto a pH muy bajos como a pH muy altos. Por ello, es importante entonces, encontrar las formas de mantener el pH del suelo en el rango óptimo.

Muchos suelos incrementan su acidez mediante procesos naturales. La acidificación del suelo es resultado de la pérdida de bases por la lixiviación, provocada por el agua que se filtra hacia abajo del perfil del suelo, por la extracción de iones de nutrimentos por las plantas y su remoción por la cosecha o por el pastoreo, y la producción de ácidos orgánicos por las raíces de las plantas y los microorganismos. Los suelos que tienen poca capacidad para amortiguar estos procesos de entradas y remociones tenderán a incrementar su acidez.

Salinidad y Alcalinidad

En los suelos de regiones áridas y semiáridas del mundo es común la acumulación de sales, tanto en formas solubles como insolubles. Las sales son el producto del intemperismo del material parental, combinadas con las sales adicionadas en condiciones de poca precipitación, que no son removidas por lixiviación. En áreas de baja precipitación y alta evaporación, las sales disueltas tales como Na^+ y Cl^- son comunes, combinadas con otras como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- y NO_3^- . Frecuentemente el riego adiciona más sales al suelo, especialmente en áreas con alto potencial de evaporación (Capítulo 9), donde las sales adicionadas llegan a la superficie del suelo por el movimiento capilar durante la evaporación. Además, muchos fertilizantes inorgánicos, tales como el nitrato de amonio, pueden incrementar la salinidad debido a que se encuentran en forma de sales.

Los suelos con alta concentración de sales neutras (ejemplo NaCl o NaSO_4) son llamados salinos. En los casos donde el sodio se combina con aniones débiles (tales como HCO_3^-), se crean suelos alcalinos, los cuales tienen generalmente un pH mayor a 8,5. Los suelos con altos niveles de sales neutras constituyen un problema para las plantas debido al desbalance os-

mótico. Los suelos alcalinos son un problema debido al exceso de iones OH^- , por la dificultad para la extracción de nutrimentos y para el desarrollo de las plantas. En algunas regiones, las condiciones salino-alcalinas ocurren cuando ambas formas de sales se encuentran presentes. El manejo adecuado del agua del suelo e irrigación llega a ser el aspecto clave para enfrentar estas condiciones.

NUTRIMENTOS DEL SUELO

Debido a que las plantas obtienen sus nutrimentos del suelo, la disponibilidad de estas sustancias en el suelo llega a ser el factor determinante de la productividad en un agroecosistema. Muchas metodologías de análisis de nutrimentos han sido desarrolladas para determinar el nivel de varios nutrimentos en el suelo. Cuando un nutrimento no está presente en cantidades suficientes se le llama **nutrimento limitante** y debe ser adicionado. Las tecnologías de fertilización han nacido y se han desarrollado para llenar estas necesidades. No obstante, debe tenerse en mente que la presencia de un nutrimento no necesariamente significa que está *disponible* para las plantas. Una variedad de factores—incluyendo el pH, la capacidad de intercambio de cationes y la textura de suelo—determina la disponibilidad real de los nutrimentos.

Debido a las pérdidas o exportaciones de nutrimentos fuera del suelo por la cosecha, lixiviación, o la volatilización, los fertilizantes deben ser agregados continuamente en grandes cantidades, en muchos agroecosistemas. Pero el costo de los fertilizantes como insumo está aumentando, y el fertilizante lixiviado contamina las fuentes de agua superficiales y subterráneas; de este modo, el entendimiento de cómo deben reciclarse eficientemente los nutrimentos en los agroecosistemas es esencial para la sostenibilidad a largo plazo.

Como se describió en el Capítulo 2, los nutrimentos mayores de las plantas son el carbono, el nitrógeno, el oxígeno, el fósforo, el potasio y el azufre. Cada uno de estos nutrimentos es parte de un ciclo biogeoquímico diferente y requiere de un manejo del suelo de una forma única. El manejo del carbono será discutido más adelante en términos de materia orgánica; el nitrógeno en el suelo está incluido en la discusión de mutualismo y el papel ecológico de las bacterias fijadoras de nitrógeno y las leguminosas en el Capítu-



FIGURA 8.4
Rutas del ciclo del fósforo en los agroecosistemas.

lo 16. Aquí, como un ejemplo de un importante nutriente en el suelo, se analiza el fósforo. Debido a que del reciclaje eficiente del fósforo depende principalmente de lo que pase en el suelo, ello puede enseñarnos mucho sobre el manejo sostenible de los nutrimentos.

A diferencia del carbono y del nitrógeno, cuyos principales reservorios están en la atmósfera, el principal reservorio del fósforo está en el suelo. Este mineral existe naturalmente en el ambiente como fosfato. El fosfato puede encontrarse en la solución del suelo como ión fosfato inorgánico (especialmente como PO_4^{3-}), como una parte de los componentes orgánicos disueltos. Sin embargo, la principal fuente de fosfato es el intemperismo del material parental; de este modo, la entrada de fósforo en el suelo y el ciclo del fósforo en el agroecosistema está limitado por los índices relativamente bajos de estos procesos geológicos.

Los iones fosfatos inorgánicos solubles son absorbidos por las raíces de las plantas e incorporados dentro de la biomasa de la misma. El fósforo en esta biomasa puede tomar una de tres rutas diferentes, de-

pendiendo de cómo es consumida la biomasa. Como se muestra en la Figura 8.4: el consumo de la biomasa vegetal por plagas herbívoras, por animales en pastoreo o por los humanos, mediante la cosecha, incluye las tres rutas. El fósforo en la primera ruta es retornado al suelo como excreta, donde es descompuesto e integrado a la solución del suelo. En la segunda ruta, este elemento puede ser reciclado de la misma manera, pero si el animal de pastoreo llega al mercado, parte del fósforo se va con él. En la tercera ruta, existe muy poca posibilidad de que el fósforo retorne al suelo del cual fue extraído (excepto en muchas partes de China, donde la excreta humana es usada como fertilizante).

La mayor parte del fósforo consumido por los humanos, ya sea en la biomasa de las plantas o en la carne de animales de pastoreo, es esencialmente perdido del sistema. Un ejemplo de lo que puede ocurrir al fósforo en la tercera ruta (consumo humano) puede servir para ilustrar el problema: en Florida el fósforo es extraído de los depósitos marinos ricos en este mineral, que han emergido por un proceso geológico y queda expuesto, es procesado como fertilizante soluble o triturado como polvo de roca y embarcado hacia las granjas de Iowa, donde es aplicado al suelo para la producción de soya. Una parte del fósforo, bajo forma de fosfatos, es absorbido por las plantas y almacenado en los granos de soya que son cosechados y enviados a California, donde son convertidos en pasta de soya (*tofu*). Después del consumo de la pasta de soya, mucho del fosfato liberado se va en el sistema de alcantarillado local y eventualmente, termina retornando al mar a 3 000 millas de donde se originó. Debido a que el tiempo necesario para que se acumulen suficientes sedimentos de rocas ricas en fosfato y a que los procesos geológicos en que emergen son mucho mayores que el tiempo que han vivido los humanos, y debido a que las reservas conocidas de fosfatos fácilmente disponibles son limitadas, las prácticas convencionales de manejo del fertilizante fosfatado en muchos agroecosistemas modernos pueden considerarse no sostenibles.

Para que el manejo del fósforo sea sostenible, el fosfato debe pasar rápidamente a través del componente suelo al ciclo y regresar a la planta, para que no sea fijado en sedimentos o lavado hacia el mar. Se deben encontrar formas para mejorar el almacenamiento del fósforo en forma orgánica, tanto como biomasa

establecida o como materia orgánica del suelo y asegurar que, tan rápido como sea posible, el fósforo sea liberado de estas formas orgánicas, así podrá ser rápidamente reabsorbido por los microorganismos del suelo o por las raíces de las plantas.

Un componente adicional de manejo sostenible del fósforo del suelo tiene que ver con su formación y la de los componentes fosfóricos insolubles en el suelo. Los fosfatos en la solución del suelo frecuentemente reaccionan químicamente (especialmente con hierro y aluminio) para formar componentes insolubles, o es atrapado en las micelas de las arcillas donde no está disponible para los recolectores biológicos. El pH bajo en el suelo exagera el problema de la fijación de fosfato bajo formas insolubles. No obstante, al mismo tiempo este proceso constituye un fuerte mecanismo para retener fósforo en el suelo de los agroecosistemas; los fertilizantes fosfatados aplicados al suelo son retenidos casi completamente. Algunos suelos agrícolas en California tienen niveles de fósforo total muy altos (aunque no disponible fácilmente) después de varios decenios de trabajo agrícola. Así, el escape del fósforo de los agroecosistemas puede ser muy pequeño, pero la falta de disponibilidad del fósforo en el componente suelo del sistema una vez que éste es fijado, requiere mayores aplicaciones de fósforo disponible como fertilizante. Por supuesto, los medios biológicos para liberar el fósforo "almacenado" pueden contribuir a la sostenibilidad. Estos medios tienen mucho que ver con el manejo de la materia orgánica.

MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

En ecosistemas naturales, los contenidos de materia orgánica del horizonte A pueden ser de 15% a 20% o más; en la mayor parte de los suelos el porcentaje se encuentra entre 1% y 5%. En ausencia de la intervención del hombre el contenido de materia orgánica del suelo depende especialmente del clima y de la cobertura vegetal; generalmente, se encuentra más materia orgánica bajo condiciones de climas fríos y húmedos. También es conocido que hay una estrecha correlación entre las cantidades de materia orgánica en el suelo y los contenidos de carbono y nitrógeno. Una estimación muy aproximada de los contenidos de materia orgánica puede obtenerse multiplicando los contenidos de carbono total por dos, o los conte-

nidos de nitrógeno total por 20.

La materia orgánica del suelo está conformada por diversos componentes heterogéneos. El material viviente incluye raíces, microorganismos y fauna del suelo; el material no viviente incluye la hojarasca superficial, raíces muertas, metabolitos microbianos y sustancias húmicas. El componente no viviente está presente en mayor proporción. La interacción entre la materia orgánica viviente y la no viviente ocurre constantemente. Los componentes complejos de carbono en los residuos frescos de plantas son rápidamente metabolizados o descompuestos, por el proceso conocido como **humificación**, que eventualmente le da un color oscuro al suelo y produce residuos húmicos o humus. Los residuos húmicos consisten en polímeros aromáticos condensados, que son relativamente resistentes a una mayor descomposición y comúnmente son capaces de estabilizarse en el suelo. La fracción de la materia orgánica que llega a ser estabilizada, eventualmente mediante la **mineralización**, libera nutrimentos minerales que pueden ser absorbidos por las raíces de las plantas. Se alcanza un equilibrio entre la humificación y la mineralización, pero este equilibrio está sujeto a cambios dependiendo de las prácticas agrícolas.

Durante su vida en el suelo, la materia orgánica tiene funciones de mucha importancia, todas ellas son importantes para la agricultura sostenible. Además de constituir la fuente más obvia de nutrimentos para el crecimiento de las plantas, la materia orgánica construye, promueve, protege y mantiene el ecosistema del suelo, tal como lo hemos discutido siempre, ella es el componente clave de una buena estructura del suelo, incrementa la retención de agua y de nutrimentos, es la fuente de alimento para microorganismos del suelo y provee una importante protección mecánica para la superficie del suelo. No obstante, dependiendo de las prácticas de cultivo utilizadas, estas acciones pueden ser alteradas rápidamente -para bien o para mal. De todas las características del suelo, el factor que nosotros podemos manipular con mayor facilidad es la materia orgánica.

Una vez que un suelo es cultivado, los niveles originales de materia orgánica comienzan a reducirse a menos que se cumplan algunos pasos específicos para mantenerla. Después de una reducción inicial rápida, disminuye el descenso. Como consecuencia de la pérdida de la materia orgánica ocurren diversas cla-

ses de cambios en el suelo. La estructura grumosa se pierde, la densidad aparente comienza a incrementarse, la porosidad del suelo se deteriora y declina la actividad biológica. La compactación del suelo y el desarrollo de una capa endurecida a la profundidad promedio del cultivo, llamada piso de arado, puede llegar a ser también un problema.

El límite al cual los contenidos de materia orgánica se reducen en un suelo cultivado, depende del cultivo y las prácticas de cultivo. Algunos ejemplos se presentan a continuación.

En un estudio, los contenidos de materia orgánica de los primeros 25 cm del suelo, en dos agroecosistemas dedicados a la producción vegetal intensiva en la costa central de California, fueron comparados entre ellos y contra un pastizal no cultivado como testigo. Un sistema ha sido trabajado por 25 años usando prácticas agrícolas orgánicas; el otro, por 40 años bajo prácticas convencionales. El estudio muestra que los contenidos de materia orgánica han sido reducidos de 9,869 kg m³ hasta 8,705 kg m³ en el sistema orgánico y hasta 9,088 kg m³ en el sistema convencional (Waldon 1994). Aún con altos insumos de materia orgánica como compost y cultivos de cobertura, durante el invierno en el sistema orgánico, las prácticas de cultivo y la cosecha redujeron significativamente la materia orgánica del suelo aún más que en el sistema convencional.

En otro caso, después de 15 años de producción continua de granos como maíz y arroz, la materia orgánica en los primeros 15 cm de un suelo, aluvión arcilloso pesado en las tierras bajas húmedas del trópico en Tabasco, México, se ha reducido a menos de 2%, comparado con los contenidos de materia orgánica de más de 4% en un área adyacente con selva tropical, que nunca ha sido cortada (Gliessman y Amador 1980). Una plantación de cacao con cobertura de árboles en el mismo tipo de suelo, mantuvo el contenido de 3,5% de materia orgánica en la misma capa, demostrando el impacto negativo que tiene el disturbio del suelo sobre la materia orgánica en sistemas de cultivo y el papel de la cobertura vegetal en la retención de la misma.

Un estudio que comparó suelos con más de 75 años de producción orgánica y convencional de trigo en el este de Washington, mostró que la materia orgánica no sólo se mantiene en el sistema orgánico, sino que se incrementa con el tiempo, mientras que los niveles de producción para el agricultor orgánico fue-

ron casi iguales al convencional (Reganold *et al.* 1987). Podemos ver a partir de estos tres ejemplos que los tipos de cultivo, el manejo de los insumos, el ambiente local y las prácticas de cultivo, determinan el impacto de la agricultura sobre la materia orgánica del suelo a largo plazo.

MANEJO DEL SUELO

En los sistemas agrícolas actuales, el suelo es considerado como el medio para sostener las plantas. No obstante, cuando el suelo es manejado para producción sostenible y el énfasis es puesto en el papel de la materia orgánica, su papel aumenta.

Muchos agricultores sienten que si se obtiene un rendimiento alto de la tierra, entonces esto evidencia un suelo productivo. No obstante, si la perspectiva es agroecológica y la meta es mantener y promover la formación del suelo y los procesos para su protección, incluyendo la materia orgánica, entonces un suelo productivo no es necesariamente un suelo fértil. Los procesos que permitan al suelo producir un cultivo son más importantes en la agricultura sostenible. Los fertilizantes pueden ser aplicados para incrementar la producción, pero sólo mediante un entendimiento de los ciclos de nutrimentos y los procesos ecológicos del suelo, especialmente de la dinámica de la materia orgánica, puede mantenerse o restaurarse la fertilidad del suelo.

Manejo de la Materia Orgánica del Suelo

Uno de los primeros pasos en el desarrollo de la materia orgánica del suelo es mantener entradas constantes de nueva materia orgánica, para reemplazar la que se pierde por la cosecha y la descomposición. Si el agroecosistema fuera más parecido a los ecosistemas naturales, además del cultivo o cultivos una diversidad de especies de plantas podrían estar presentes. Muchos sistemas agroforestales (Capítulo 17), especialmente en agricultura tropical, tienen gran número de plantas, muchas de las especies no cultivables, cuyo papel primario es la producción de biomasa y el retorno de la materia orgánica al suelo. Pero la agricultura de hoy día, con su enfoque de mercado, ha reducido tanto la diversidad de plantas que muy poca materia orgánica es retornada al suelo.



FIGURA 8.5
Quema de residuos de cultivo en Taiwán. La quema es un método común para remover los residuos del cultivo. Aunque ello retorna algunos nutrientes al suelo y ayuda al control de plagas y enfermedades, la quema causa contaminación del aire y evita que los residuos de cultivo sean incorporados dentro del suelo como materia orgánica. Cuando el residuo del cultivo es visto como un recurso útil y de valor para el mantenimiento de la materia orgánica del suelo, pueden desarrollarse técnicas para incorporarlo dentro del suelo como alternativa a la quema.

Residuos de Cultivo

Una importante fuente de materia orgánica son los residuos de cultivo. Muchos agricultores están evaluando las mejores maneras de retornar al suelo las partes de los cultivos que no están destinadas para uso humano o animal. Sin embargo, deben resolverse diversas controversias para poder desarrollar estrategias de manejo efectivas para los residuos de cultivos. La más importante concierne en cómo enfrentarse con organismos que pueden ser plagas o enfermedades potenciales, que los residuos pueden portar y pasar a los cultivos subsecuentes. El momento adecuado para la incorporación de los residuos al suelo, la rotación de cultivos y el compostaje de los residuos fuera de los campos y después retornarlos cuando el compost esté terminado, son posibles maneras de resolver estos problemas que, sin embargo, necesitan ser más evaluados.

Cultivos de Cobertura

Sembrar coberturas, donde la cobertura se planta específicamente para producir material vegetal para incorporarla al suelo como "abono verde", es otra fuente importante de materia orgánica. Las plantas de cobertura son usualmente producidas en rotación con un cultivo, o durante una época del año en que el

cultivo no puede crecer. Cuando las leguminosas son usadas como cultivos de coberteras, tanto solas como en combinación con especies no leguminosas, la calidad de la biomasa puede mejorarse mucho. La biomasa resultante puede ser incorporada al suelo, o dejada sobre la superficie como un acolchado o cobertura protectora hasta su descomposición.

En investigaciones realizadas en la Universidad de California, Santa Cruz (Gliessman 1987), una variedad local de frijol haba llamado "frijol campana" (*Vicia faba*), fue sembrado como cultivo de cobertura en combinación con cereales, ya sea centeno o cebada, durante la estación húmeda del invierno en período de descanso. Se mostró que el total de materia seca producida en la mezcla gramínea/leguminosa fue siempre el doble que el de la leguminosa sola. Después de tres años de usar el cultivo de cobertura, los niveles de materia orgánica en los suelos bajo cobertura mixta mejoraron hasta en 8,8%. Interesantemente, los suelos con solo cobertura de leguminosa bajaron ligeramente su contenido de materia orgánica después de tres años, probablemente porque la baja relación C/N de la materia orgánica incorporada causó un descenso microbiano más rápido.

Una innovación más reciente en el enfoque de los cultivos de cobertura es el uso de cobertura viva, donde una especie que no es el cultivo se planta entre las



FIGURA 8.6

Esparcidor de estiércol usado en una granja lechera cerca de Cody, Wyoming. El estiércol maduro es retornado a los campos en los cuales creció el alimento para las vacas de la granja lechera.

los surcos durante el ciclo del cultivo. Las coberturas vivas son muy usuales en viñedos, huertos y sistemas de cultivos con árboles. Se necesitan mucho más investigaciones para minimizar las interacciones negativas entre la cobertura y las especies cultivadas, especialmente coberturas vivas en cultivos anuales.

Estiércoles

Una práctica usada por mucho tiempo, tanto en sistemas agrícolas convencionales como alternativos, es la adición de estiércol al suelo para mejorar los contenidos de materia orgánica. Las lecherías y la estabulación de animales produce grandes cantidades de excrementos de animales que son convertidos en un recurso útil cuando se retornan al campo. En las granjas pequeñas se puede usar el estiércol que se acumula en establos o corrales para la producción vegetal intensiva. El uso del excremento del gusano de seda en la agricultura China es otro ejemplo del uso de abonos animales. No

obstante, la investigación ha demostrado que la aplicación directa de estiércol también provoca muchos problemas. El mal olor y las moscas están relacionadas frecuentemente con aplicaciones directas de estiércol. La pérdida de nitrógeno mediante la amonificación puede ser bastante alta. La lixiviación de nitratos y otros materiales solubles puede ser un problema. Una vez que el estiércol fresco es incorporado al suelo, hay que esperar un tiempo para que se descomponga y estabilice antes de que el cultivo pueda ser establecido. La investigación tiene ahora que enfocarse en la maduración o compostaje del estiércol antes de su aplicación.

Composta

El compostaje ha sido un proceso donde se han logrado muchos avances recientes por la investigación. Diferentes fuentes de materiales orgánicos, desde estiércoles hasta subproductos agrícolas, incluyendo pastos de corte, han sido convertidos en útiles mejoradores de

CUADRO 8.3 Materiales orgánicos de desechos empleados en la producción de composta

Subproductos Agrícolas	Estiércoles
Harina de hoja de alfalfa	Estiércol de animales para la producción de carne en sistemas estabulados
Bagazo de manzanas y uvas	Estiércol de lecherías
Harina de sangre	Cama de pollos para asar
Harina de hueso	Cama de gallinas ponedoras
Harina de semilla de	Cama de pavos algodón
Harina de plumas	Estiércol de puerco
Cáscara de almendra y nuez	Estiércol de caballo
Pulpa de café	Estiércol de borrego
Pulpa de cacao	Estiércol de cabra
Torta de soya	
Cascarilla de arroz	
Desechos de jardines y prados	



FIGURA 8.7

Desechos de granja que son convertidos en compost en una granja de la costa central de California. La descomposición del material vegetal por los microorganismos libera cantidades significativas de energía en forma de calor.

suelos mediante proceso del compostaje. Bajo condiciones controladas, la materia orgánica cruda pasa a los primeros estados de descomposición y humificación, de tal forma que cuando es adicionada al suelo, se ha estabilizado considerablemente y puede contribuir de forma más eficiente a los procesos de formación de la fertilidad del suelo. De esta manera, estiércoles -incluyendo materiales que anteriormente se enviaban a las áreas de relleno -se han convertido en recursos.

El vermicompost o el compost producido por la acción de las lombrices, está también convirtiéndose en una fuente popular de materia orgánica del suelo, especialmente en granjas pequeñas y jardines. La materia orgánica fresca y húmeda, especialmente residuos de comidas, es consumida por lombrices conocidas por su habilidad para elaborar compost (las lombrices rojas como *Eisenia foetida* son especialmente eficaces), y se han desarrollado sistemas donde una pequeña cámara casera de vermicompost puede producir más de 25 kg por mes. Este compost es conocido por su alto nivel de fosfatos, nitrógeno y otros nutrimentos y también, contiene polisacáridos

que aglutinan las partículas del suelo y ayudan al desarrollo de la materia orgánica del suelo. Investigadores cubanos han desarrollado recientemente sistemas de vermicompost a escala de granja que son diseñados para reemplazar los fertilizantes importados que son difíciles de obtener. Un mayor desarrollo de los sistemas a gran escala podría ayudar mucho en el mejoramiento del manejo del suelo.

Otras Enmiendas del Suelo

También se pueden usar otros tipos de enmiendas orgánicas de suelo. En el mercado se encuentran humatos, algas, harina de pescado, subproductos animales, y guano, entre otros. Cada uno tiene aplicaciones específicas, ventajas, desventajas y escalas óptimas de uso. Cada fuente de materia orgánica

debe ser evaluada por la respuesta del cultivo a corto plazo, pero sobre todo por su posible contribución al desarrollo y mantenimiento de la materia orgánica del suelo a largo plazo.

Aguas Negras

Una fuente final de materia orgánica -subutilizada excepto en pocas partes del mundo- son las aguas negras. Para completar los ciclos nutrimentales, los nutrimentos que salen de la granja deben finalmente regresar a ésta. Si estos pueden regresar en forma orgánica, entonces también se adicionarán a los procesos de construcción del suelo.

Los materiales sólidos removidos de las aguas negras durante su tratamiento, conocidos como lodos residuales, han sido esparcidos sobre la tierra por décadas. Con respecto a un porcentaje del peso seco, los lodos residuales pueden contener del 6% al 9% de nitrógeno, del 3% al 7% de fósforo y más de 1% de potasio. Pueden ser aplicados como pasta seca o gránulos, con contenidos de agua del 40% al 70%, o en forma líquida con 80% a 90% de agua. Los lodos

residuales son muy usados para césped, tierras degradadas y aun en terrenos sembrados con árboles frutales. La porción líquida del agua residual tratada, conocida como efluente, ha sido aplicada a la tierra por largo tiempo en Europa y algunos sitios de Estados Unidos. En algunas ciudades funciona lo que se llama como granjas de aguas residuales, donde el efluente es usado para producir cultivos, usualmente alimento para animales y forrajes, que parcialmente compensan el costo de su aplicación, aunque en otros casos es usado para irrigación de campos de golf, bordes de autopistas e incluso bosques.

No obstante, hay mucho que aprender sobre cómo tratar las aguas negras para que los patógenos sean eliminados. La recolección, el tratamiento y el transporte necesitan ser evaluados bajo un enfoque cuya meta sea la de unir el manejo de los residuos con la agricultura sostenible. El hecho de que en muchos sistemas de aguas negras alrededor del mundo no separan los residuos humanos de los industriales, contaminan los lodos resultantes con cantidades tóxicas de metales pesados y esto complica el proceso.

No obstante, el agua residual llegará indudablemente a ser un recurso muy importante en el futuro como una fuente de materia orgánica, nutrimentos y agua para la producción de cultivos. Muchas prácticas tradicionales y a pequeña escala para convertir las aguas negras en un recurso útil, pueden servir como base para futuras investigaciones sobre este importante eslabón de la sostenibilidad.

Sistemas de Labranza

La sabiduría convencional en la agricultura es tal que el suelo debe ser cultivado para controlar arvenses, incorporar materia orgánica y permitir el crecimiento de las raíces. No obstante, además de sus beneficios potenciales, el cultivo promueve la pérdida de la buena estructura del suelo y de la materia orgánica, y el suelo cultivado puede llegar a perder algunos elementos importantes para la productividad. Por esta razón, el poner atención a cómo el suelo es cultivado debe ser una parte integral del manejo de la materia orgánica.

Existen muchos patrones diferentes de labranza del suelo, pero el principal patrón empleado en agricultura convencional es el de tres fases, que incluye una labranza profunda que da vuelta al suelo, una labranza secundaria para preparar la cama de la semilla

y finalmente, un cultivo después de la siembra (frecuentemente combinado con el uso de herbicidas) para controlar arvenses. La erosión del suelo, la pérdida de la buena estructura del suelo y la lixiviación de nutrimentos, son problemas asociados con este tipo de labranza. Además de estos problemas, la mayor parte de los sistemas agrícolas convencionales, especialmente los que producen granos anuales y verduras, dependen de una labranza extensiva y repetida.

En el otro extremo, hay muchos sistemas agrícolas tradicionales en los cuales la cero labranza es usada siempre. En la agricultura transhumante, los productores tradicionales limpian la tierra usando las técnicas de la roza y quema y después, hacen hoyos en el suelo con una coa o macana para sembrar las semillas. Tales sistemas, que tienen historia de manejo sostenible, respetan las necesidades de un periodo de descanso para controlar las arvenses y para permitir los procesos naturales de construcción del suelo para reemplazar los nutrimentos removidos. Muchos sistemas agroforestales, tales como el café o el cacao bajo sombra, dependen de los componentes arbóreos del sistema para proveer cobertura al suelo y reciclaje de nutrimentos, y sólo tienen una capa superficial de arvenses ocasionalmente. Por otro lado, las pasturas pocas veces son cultivadas.

Las técnicas de labranza alternativa, muchas de ellas copiadas de las prácticas agrícolas tradicionales, han sido desarrolladas y probadas en sistemas de cultivos anuales convencionales. Esto ha demostrado que los sistemas de cultivos anuales no tienen que depender de una labranza extensiva y repetida y que su reducción puede ayudar a mejorar la calidad del suelo y su fertilidad (House *et al.* 1984).

Usando las técnicas de **cero labranza**, la preparación del suelo está limitada a la cama actual de siembra y se efectúa al mismo tiempo que se planta la semilla, en algunos casos se usa equipo especial que permite plantar directamente dentro de los residuos de cultivos dejados en el campo. Otros pasos tales como la fertilización y el control de arvenses, pueden completarse al mismo tiempo que la siembra. Desafortunadamente, muchos sistemas de cero labranza han desarrollado gran dependencia de los herbicidas, lo cual ocasiona otros problemas ecológicos.

Con el fin de reducir el uso de los herbicidas, se han desarrollado algunos sistemas de **labranza redu-**

ESTUDIO DE CASO

Manejo del Suelo en los Sistemas de Terrazas de Laderas de Tlaxcala, México

La conservación de suelos es especialmente importante en áreas donde la gente debe producir su comida sobre pendientes empinadas erosionables. Una práctica tradicional común en estas tierras es construir terrazas. En Tlaxcala, México, los agricultores locales cultivan sistemas de terrazas de ladera que no solo previenen la erosión del suelo, sino que también conservan eficientemente el agua de la lluvia. Estos sistemas cuentan con agri-

cultores tradicionales capacitados en esta región para mantener la integridad y fertilidad del suelo por siglos, sin depender de insumos producidos comercialmente e importados tales como los fertilizantes (Mountjoy y Gliessman 1988).

La precipitación en Tlaxcala tiene períodos de lluvia intensa capaces de causar erosión severa. Los agricultores en la región se han adaptado a estas condiciones, creando unas terrazas combinadas con sistemas de captación. Las terrazas proveen superficies horizontales para la siembra y previenen que el suelo se mueva pendiente a bajo. Ellas están complementadas por una serie de canales que dirigen la escorrentía hacia un gran conjunto de tanques llamados *cajetes*. El agua que es recolectada en estos tanques es capaz de percolar lentamente dentro del suelo después de que la lluvia ha finalizado, sin que ésta se pierda del sistema. Es igualmente importante, que cualquier suelo erosionado por la escorrentía se asiente en el fondo de los *cajetes*, y los agricultores pueden periódicamente retornarlo y esparcirlo sobre los campos.

El éxito de estos sistemas es evidenciado por su longevidad. Las terrazas y sistemas de *cajetes* de Tlaxcala han sido usados desde la época prehispánica; evidencias arqueológicas indican que los canales y terrazas fueron ubicados en este lugar aproximada-



FIGURA 8.8

Cajetes entre las terrazas en Tlaxcala, México. Los cajetes disminuyen la erosión mientras que conservan agua y mejoran su percolación por el suelo debido a la captura de agua y sedimentos.

mente 1 000 años A.C. Combinado con aplicaciones periódicas de estiércol de fuentes locales de producción animal, el sistema de terrazas para la conservación de suelos ha sido extremadamente exitoso, para mantener la fertilidad de los suelos fácilmente erodables de Tlaxcala.

Otra medida del éxito de estos sistemas tradicionales puede observarse en el problema que ha acompañado a los intentos del gobierno mexicano para modernizar la producción en la región de Tlaxcala. El uso de tractores para preparar los campos ha crecido a expensas de los sistemas de *cajetes*; más que diseñar campos con arreglo de *cajetes* que permitan el uso de tractores, muchos agricultores simplemente han rellenado los *cajetes* existentes, interrumpiendo el complicado sistemas de canales y causando drásticos incrementos en la erosión y la escorrentía durante las tormentas grandes.

Es importante notar que esta consecuencia no significa que el uso del tractor en sí mismo sea el culpable, o que toda la modernización de las prácticas agrícolas podrían ser desastrosas en esta región. Más bien, indica que cualquier intento de modernizar o mejorar las prácticas agrícolas en el área, deben beneficiarse de una evaluación de las técnicas agrícolas tradicionales y el conocimiento extensivo de las condiciones locales sobre las cuales están basadas.

cida. Uno en particular que ha sido muy exitoso para la producción de maíz y soya es la **labranza alomada**. Después de una labranza inicial y la formación de la cama de siembra o camellón, la única práctica que se efectúa es la siembra de la semilla y el manejo de las arvenses con equipos de labranza especiales, diseñados para que cultiven la superficie del suelo solamente. Algunos sistemas de labranza alomada pueden ser producto de muchos años de siembras repetidas sin labranza profunda, y la poca remoción del suelo ayuda a preservar la materia orgánica y la estructura.

La granja Thompson en el condado de Boone, Iowa es un ejemplo bien conocido de una granja diversificada exitosa, que opera y que tiene como pieza central el uso de los programas de labranza alomados modificados (NRC 1989). Equipos de siembra especiales cortan un par de pulgadas de la parte de arriba de cada camellón al sembrar, quemando las arvenses, sembrando la semilla y aplicando previamente compost en la zona entre las hileras. El uso subsecuente del azadón rotatorio y cuchillas, eventualmente levanta al suelo alrededor de los cultivos plantados en el área libre de arvenses en medio de las lomas. Este proceso mantiene el control de arvenses hasta que el cultivo se desarrolle suficiente para suprimir las arvenses por sí mismo. El tiempo de cada operación tiene importancia crítica.

El reto para la investigación sobre los sistemas de labranza reducida es cómo encontrar maneras para reducir la labranza, sin incrementar los costos de los insumos utilizados en el sistema, especialmente esos que involucran el uso de combustibles químicos o fósiles.

Manejo Sostenible del Suelo

Cuando el suelo es considerado como un sistema dinámico viviente -un ecosistema- el manejo para la sostenibilidad se convierte en un proceso integrado y del sistema en su totalidad. Enfocarse sobre los procesos que promueven el mantenimiento de un sistema productivo, dinámico y saludable es absolutamente esencial. El manejo de la fertilidad está basado en el entendimiento de los ciclos de nutrientes, del desarrollo de la materia orgánica y del balance entre los componentes vivientes y no vivientes del suelo. Al poner en práctica nuestro entendimiento de los procesos ecológicos que mantienen la estructura y función del ecosistema suelo en el tiempo,

es el aspecto más importante. Y como el ecosistema del suelo es una serie de componentes y procesos complejos, dinámicos y siempre cambiantes, nuestro entendimiento de esta complejidad debe aumentar. El manejo sostenible del suelo puede darse sólo mediante este enfoque.

Ideas para Meditar

1. La materia orgánica está considerada como uno de los componentes más importantes de un ecosistema de suelos saludables, pero muchas actividades agrícolas (ejemplo, labranza, quema, cultivo, cosecha) remueve, reduce o degrada la materia orgánica. ¿Cuáles son algunas de las muchas formas prácticas de mantener este recurso valioso en el suelo?
2. ¿Cuál es el factor clave que determina en cuánto tiempo un suelo degradado puede ser restaurado hasta alcanzar condiciones similares a las que tenía antes de su degradación?
3. ¿Cuál es la diferencia entre lodo y suelo?
4. Recientemente ha sido propuesto que nosotros desarrollemos algunos indicadores de "salud del suelo" en vías de determinar la sostenibilidad de diferentes prácticas agrícolas. ¿Cuáles indicadores piensa usted que podrían ser usados para evaluar la salud del suelo?
5. ¿Por qué es importante para los agricultores aprender a usar el concepto del ecosistema del suelo?

Lecturas Recomendadas

Brady, N.C. and R.R. Weil. 1996. *The Nature and Properties of Soils*. Eleventh Edition. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ.

Uno de los libros de referencia más completos sobre el suelo como un recurso natural; resalta las diversas interacciones entre el suelo y otros componentes del ecosistema. Reconocido libro de texto de la ciencia del suelo.

Frissel, M.J. (ed.). 1978. *Cycling of Mineral Nutrients in Agricultural Ecosystems*. Elsevier: Amsterdam.

Un trabajo pionero sobre las necesidades de un enfoque ecológico para el estudio del uso de nutrientes en la agricultura.

Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill: New York.

Texto clásico sobre suelos y los procesos de su formación: enfatizan el suelo como un sistema complejo que cambia a través del tiempo.

Paddock, J., N. Paddock, and C. Bly. 1986. *Soil and Survival: Land Stewardship and the future of American Agriculture*. Sierra Club Books: San Francisco.

Un trabajo importante sobre las necesidades de una fuerte relación entre el manejo del suelo con la sostenibilidad en la agricultura americana.

Sanchez, P.A. 1976. *Properties and Management of Soils in the Tropics*. John Wiley and Sons: New York.

Uno de los mejores tratados sobre el suelo en el trópico, analizando por qué ellos son únicos y cómo podrían ser manejados.

Smith, O.L. 1982. *Soil Microbiology: A Model for Decomposition and Cycling*. CRC Press: Boca Raton, FL.

Una revisión muy completa de los componentes mi-

crobianos del suelo y su importante papel en el reciclaje de nutrimentos y el manejo de éstos.

Stevenson, F.J. 1986. *Cycles of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, and Micronutrients*. John Wiley and Sons: New York.

Un examen de los procesos y mecanismos del ciclo de los macro y micro nutrimentos del suelo.

Swift, M.J., O.W. Heal, and J.M. Anderson. 1979. *Decomposition in terrestrial Ecosystems*. University of California Press: Berkeley.

Una revisión de cómo la descomposición y el agotamiento de la materia orgánica funciona en los ecosistemas alrededor del mundo, y por qué los procesos de descomposición son un componente importante.

Woomer, P.L., and M.J. Swift (Eds). 1994. *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons: New York.

Un enfoque ecosistémico para manejar la fertilidad del suelo en ecosistemas naturales y agrícolas, con estudios de casos de diversos tipos de regiones tropicales con énfasis en la sostenibilidad a largo plazo.

AGUA EN EL SUELO

El agua está fluyendo continuamente a través del cuerpo de la planta: saliendo por los estomas vía transpiración y entrando por las raíces. Por esta razón, las plantas requieren de una cierta cantidad de agua disponible en el suelo para sus raíces. Sin una adecuada humedad del suelo, las plantas rápidamente se marchitan y mueren. Así, el mantener suficiente humedad en el suelo es una parte crucial del manejo del agroecosistema.

Sin embargo, el manejo de la humedad del suelo no se trata simplemente de tener adecuadas entradas de agua en el suelo por la precipitación o el riego. La humedad del suelo es parte de la ecología del suelo y de todo el agroecosistema. No solo la retención y disponibilidad del agua es afectada por numerosos factores, sino que, el agua misma tiene muchas funciones. Esta transporta nutrimentos solubles, afecta la temperatura y la aeración del suelo, e influye en los procesos bióticos del suelo. Un agricultor, por lo tanto, debe de estar informado sobre cómo actúa el agua en el suelo, cómo los niveles de ésta son afectados por las condiciones climáticas y las prácticas de cultivo, cómo las entradas de agua afectan la humedad del suelo y cuáles son las necesidades de agua de los cultivos.

En pocas ocasiones la humedad disponible en el suelo es exactamente la óptima para un cultivo por periodos largos de tiempo. El agua aportada varía entre deficiencias y excesos de un día al otro y a través de las estaciones. El óptimo real es difícil de determinar, ya que es afectado por una serie de factores y las condiciones están cambiando constantemente. No obstante, se conoce mucho sobre el intervalo de las condiciones de humedad que promueven rendimientos altos de muchos cultivos. El reto es manejar el agua del suelo de tal manera que satisfaga las condiciones dentro de este intervalo.

MOVIMIENTO DEL AGUA DENTRO Y FUERA DEL SUELO

En ecosistemas naturales, el agua entra al sistema como lluvia o como nieve derretida sobre la superficie del suelo. En agroecosistemas, el agua entra de las mismas fuentes, tal como se describió en el Capítulo 6, o es aplicada por la irrigación. El manejo sostenible de la humedad del suelo depende en gran medida de la comprensión del destino del agua aplicada, con una meta de maximizar la eficiencia del agua usada por el sistema.

Infiltración

Para que el agua aplicada a la superficie del suelo llegue a estar disponible para las plantas, debe infiltrarse dentro del suelo. La infiltración no se da de una manera simple: el agua puede perderse por escorrentía superficial o también evaporarse si no puede penetrar fácilmente la superficie del suelo. La infiltración es afectada por el tipo de suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y las características de la precipitación misma. Los suelos con gran porosidad, tales como los arenosos o aquellos que tienen altos contenidos de materia orgánica, son más fácilmente infiltrados por el agua. Los terrenos planos presentan mejor infiltración que los terrenos con pendiente, y una pendiente suave pierde más agua por escorrentía que aquella que esté fracturada por variaciones microtopográficas causadas por rocas, terrones del suelo, depresiones ligeras, u otras obstrucciones sobre la superficie. La cobertura vegetal tanto viva como en forma de hojarasca sobre la superficie, ayuda mucho a la entrada inicial del agua. En general, asumiendo condiciones óptimas, entre mayor sea la intensidad de

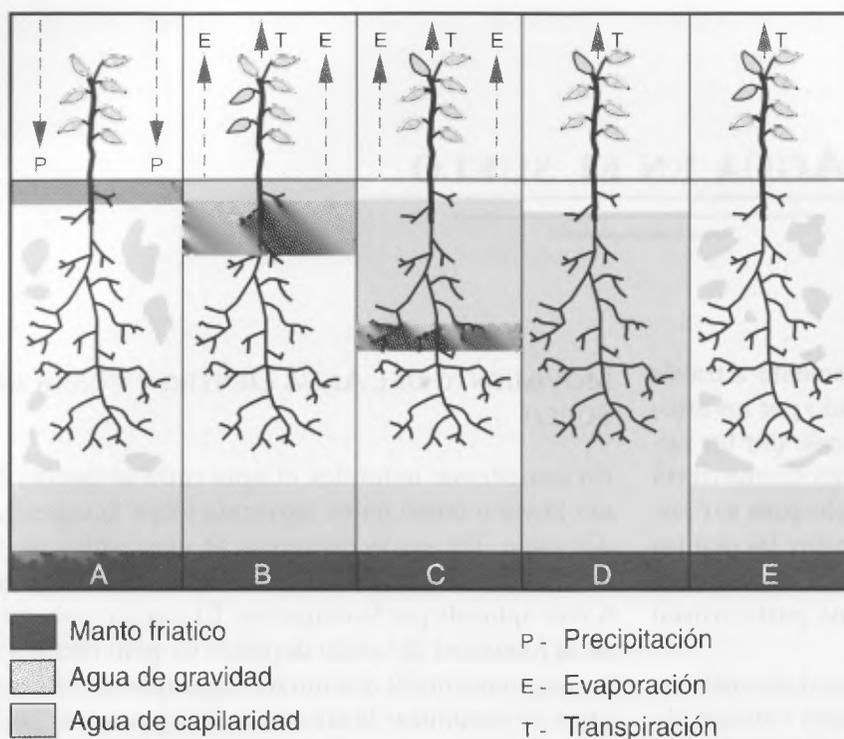


FIGURA 9.1

Movimiento del agua en el suelo en un sistema de cultivo. (A) El agua se infiltra de la superficie después de la precipitación. (B) El agua gravitacional se percola y desciende, dejando el suelo superior humedecido a capacidad de campo con agua capilar. Al mismo tiempo, la evaporación y la transpiración remueven el agua del suelo. (C) Como el agua gravitacional continúa su percolación hacia abajo, el suelo cercano a la superficie comienza a secarse. (D) Cuando el agua gravitacional alcanza el manto freático, la mayor parte del perfil del suelo es humedecido hasta cerca de la capacidad de campo. La excepción son las capas superiores del suelo, las cuales se secan por evaporación. (E) La mayor parte del suelo alcanza el límite capilar, la región que permanecía húmeda por el manto freático se drena, y el suelo se acerca al marchitamiento permanente. Adaptado de Daubenmire (1974).

la lluvia, mayor será la infiltración hasta que la saturación es alcanzada. No obstante, con una intensidad de lluvia excesiva, el incremento de la escorrentía puede ocurrir.

Percolación

Cuando se alcanza la saturación de las capas superficiales del suelo, las fuerzas gravitacionales comienzan a empujar el exceso de agua a más profundidad dentro del perfil de suelo. Este proceso conocido como

percolación, se muestra en la Figura 9.1. La intensidad de la percolación está determinada por la porosidad, textura y estructura del suelo. Un suelo con una estructura grumosa y buena estabilidad de agregados, facilitará el movimiento libre del agua dentro de las partículas del suelo. Los suelos con textura arenosa tienen gran espacio poroso y menos área superficial suelo-partícula para retener el agua, que aquellos suelos con textura más finas, y de esta manera permiten un rápido movimiento del agua en el suelo. Un suelo con contenidos de arcilla muy altos puede tener una percolación inicial rápida; sin embargo, una vez que las micelas de la arcilla se llenan de agua, pueden cerrar el espacio poroso e impedir el movimiento. Los espacios dejados por las raíces y las galerías construidas por animales, especialmente aquellas formadas por lombrices de tierra, son importantes rutas de percolación; sin embargo, la textura del suelo y la estructura tienen probablemente mayor importancia, especialmente en agroecosistemas cultivados frecuentemente.

Evaporación

Cuando la humedad entra en el suelo, puede perderse a la atmósfera mediante la evaporación. La intensidad de la evaporación en la superficie del suelo depende de los contenidos de humedad y de la temperatura de la atmósfera sobre la superficie, así como de la temperatura de la superficie del suelo mismo. Los vientos aceleran fuertemente los procesos de evaporación, especialmente con temperaturas altas. Aunque la evaporación ocurre en la superficie, puede afectar la humedad del suelo en la profundidad del perfil. Como la evaporación produce un déficit de agua en la superficie del suelo, las fuerzas de atracción entre las

moléculas del agua, atraen el agua que se encuentra más abajo por la acción capilar. Este proceso continúa hasta que la zona saturada está demasiado profundo hasta que las capas superficiales del suelo están tan secas que la capilaridad se rompe. Cualquier clase de cobertura superficial del suelo que reduzca el calor de la superficie de éste y cree una barrera entre el suelo y la atmósfera, reducirá los niveles de evaporación.

Transpiración

Como se describió en el Capítulo 3, las plantas pierden agua por los estomas en las hojas como humedad transpirada, creando un déficit de agua en la planta que es balanceado por la absorción del agua por las raíces. Esta remoción biótica del agua del suelo, especialmente por raíces que penetran las capas del suelo que están abajo de aquellas afectadas por la evaporación, constituye la mayor avenida del movimiento de agua fuera del ecosistema del suelo. Si el agua no es adicionada para reemplazar esta pérdida, las plantas tienden a la dormancia, o bien, son eliminadas del ecosistema.

HUMEDAD DISPONIBLE EN EL SUELO

Las fuerzas de atracción entre el agua y las partículas individuales del suelo juegan un papel clave en la determinación de cómo la humedad del suelo es retenida, perdida o usada por las plantas. El entendimiento de estas fuerzas se realiza observando las propiedades físicas y químicas de la **solución del suelo**, la fase líquida del suelo y los solutos disueltos que están separados de las partículas del suelo mismo.

El porcentaje de humedad disponible en el suelo para uso de las plantas ha sido tradicionalmente determinado recolectando muestras de suelo, pesándolas y secando el suelo a 105°C por 24 horas, y determinando su peso seco. La cantidad de humedad perdida durante el secado es dividida entre el peso de la muestra seca dando un valor que es expresado como porcentaje.

No obstante, este procedimiento no es el adecuado para determinar la cantidad de agua real en el suelo disponible para las plantas, porque no considera como variable importante el agua adherida a las partículas del suelo. Cuando se incrementan, tanto los contenidos de arcilla como los de materia orgánica en

el suelo, el agua es atraída con mayor fuerza a las partículas del suelo y es mucho más difícil para las raíces de las plantas extraerlas. Por ejemplo, la lechuga puede marchitarse en un suelo arcilloso con 15% de humedad; no obstante, en un suelo arenoso, la humedad puede ser menor a 6% antes de que el cultivo se marchite.

Debido a que el agua es retenida mucho más en algunas clases de suelo que en otros, se necesitan otras medidas para determinar los contenidos reales del porcentaje de humedad, que reflejen mejor las fuerzas de atracción entre las partículas del suelo y el agua. Esta medida se alcanza por la expresión de la humedad del suelo en términos de energía. La fuerza de atracción entre las moléculas del agua y las partículas del suelo, el potencial de agua del suelo, es expresado como barras de tensión o de succión, donde un bar (en español = barra) es equivalente a la presión atmosférica estándar a nivel del mar (760 mm Hg o 1020 cm de agua). Este método provee un medio para determinar la disponibilidad de agua en la solución del suelo y considera las fuerzas variantes de atracción, determinadas por el tamaño de la partícula del suelo y los contenidos de materia orgánica.

Algunos términos especiales son usados para describir los contenidos de humedad del suelo y su disponibilidad en términos de fuerza de atracción. Estos se definen a continuación y se ilustran en la Figura 9.2.

- **Agua gravitacional** es el agua que se mueve dentro, a través y fuera del suelo influenciada solamente por la gravedad. Inmediatamente después de la lluvia o del riego, esta agua comienza a moverse hacia abajo en el suelo, ocupando todos los espacios de macroporos.
- **Agua capilar** es el agua que llena los microporos del suelo y es retenida por las partículas con una fuerza entre 0,3 y 31 barras de tensión.
- **Agua higroscópica** es el agua retenida con mayor fuerza en las partículas del suelo, usualmente con más de 31 barras de tensión. Después que el suelo ha sido secado en la estufa, el agua remanente no química, es agua higroscópica.
- **Agua de hidratación** es el agua que se encuentra químicamente sujeta a las partículas del suelo.
- **Agua fácilmente disponible** es la porción del agua en el suelo que es fácilmente absorbible por las raíces de las plantas – usualmente agua capilar entre 0,3 y 15 barras de tensión.

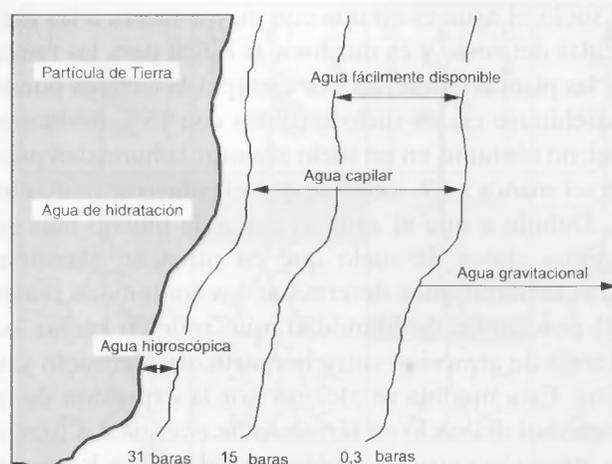


FIGURA 9.2

Humedad del suelo y su relación con las fuerzas de atracción de las partículas del suelo. El punto permanente de marchitez es alcanzado cuando el agua fácilmente disponible ha sido eliminada. La capacidad de campo es la cantidad de agua remanente después de que el agua gravitacional ha sido drenada.

- **Capacidad de campo** es la humedad remanente en el suelo después de que la fuerza gravitacional ha drenado de los macroporos el agua gravitacional, dejando los microporos llenos con agua capilar retenida a menos de 0,3 barras de tensión en las partículas del suelo
- **Punto permanente de marchitez** es la humedad contenida en el suelo a la cual las plantas se marchitan y no se recobran cuando son colocadas en un ambiente húmedo y oscuro. El punto permanente de marchitez usualmente ocurre cuando toda el agua capilar retenida a menos de 15 barras de tensión ha sido removida del suelo.

Debido a que cada suelo es una mezcla de diferentes tamaños de partículas y es variable en cuanto a los contenidos de materia orgánica, y como estas características determinan la habilidad de retención del agua, es importante determinar el tipo de suelo como parte del desarrollo de un plan de manejo del agua. En la mayor parte de los suelos, el crecimiento óptimo se obtiene cuando los contenidos de humedad del suelo se encuentran justo debajo de la capacidad de campo. Es claro que la humedad que se necesita para

un crecimiento óptimo, no debe exceder el rango completo del contenido de humedad del suelo.

CAPTACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO POR LAS PLANTAS

Cuando transpiran, las plantas deben reemplazar continuamente las cantidades significativas de agua que pierden por sus estomas. No obstante, en muchas ocasiones, sólo una pequeña proporción de agua disponible en el suelo está suficientemente cerca de la superficie de las raíces para que pueda ser absorbida en ese momento. Dos procesos compensan estas limitaciones. Primero, el agua es arrastrada pasivamente a través del suelo hacia las superficies de las raíces por medio del movimiento capilar del agua y segundo, las raíces de las plantas crecen, activamente, dentro del suelo hacia áreas con suficiente humedad para captarla.

Movimiento Capilar del Agua

Como una planta absorbe el agua a través de sus raíces para reemplazar la que se pierde por la transpiración, el contenido de humedad del suelo, del área inmediatamente circundante a las raíces, se reduce. Esto incrementa la energía de succión en esa región, creando un gradiente de potencial de agua más bajo, que tiende a arrastrar la humedad en todas las direcciones del área circundante del suelo. La mayor parte del agua es probablemente succionada de áreas más profundas del perfil del suelo, especialmente cuando el manto freático está cercano a la superficie. El movimiento capilar se debe en parte a la atracción de las moléculas del agua hacia la superficie del suelo y parcialmente, a la atracción de las moléculas del agua con otros tipos de partículas. La velocidad a la cual el movimiento capilar ocurre depende de la intensidad del déficit de agua y del tipo de suelo. En la mayor parte de los suelos arenosos, el movimiento es muy rápido, debido a que el tamaño de las partículas grandes retiene el agua con menos intensidad. En suelos con más arcilla, especialmente aquellos con una pobre estructura grumosa, el movimiento es mucho más lento.

Se ha demostrado que el movimiento del agua por la acción capilar es de sólo unos pocos centímetros al día. Debido al extensivo volumen de suelo ocupado

por la mayor parte del sistema radicular, probablemente no se necesita el movimiento a gran distancia. Las plantas pueden obtener un gran porcentaje de sus necesidades de agua mediante el movimiento capilar cuando los niveles de transpiración son muy altos. El incremento de la presión de succión creado en la zona inmediata de las raíces durante el día, es remplazado por el movimiento del agua de áreas con succión más baja durante la noche. A veces cuando los contenidos de humedad del suelo han sido severamente reducidos y el crecimiento de las plantas también se reduce, este movimiento tiene mayor significancia. De otro modo, las plantas alcanzan el punto permanente de marchitez.



FIGURA 9.3
Maíz dañado por anegamiento en Tabasco, México. Los excesos de humedad del agua en el suelo crean condiciones que pueden impedir el crecimiento o aún matar a los cultivos.

Extensión de las Raíces dentro del Suelo

Las plantas están continuamente extendiendo sus raíces dentro del suelo, asegurando que se establezcan nuevos sitios de contacto de la raíz con el suelo. Las raíces, las raicillas y los pelos radiculares combinados producen una extensiva red de interfase suelo-raíz. No obstante, a pesar de la continua penetración de las raíces y el gran volumen de la red radicular, la cantidad total del volumen de suelo que está en contacto con las raíces de las plantas en todo momento es muy pequeña. De acuerdo con la mayor parte de las estimaciones, menos del 1% del total del área superficial partícula-suelo, dentro del volumen de suelo ocupado por las raíces de las plantas, está en realidad en contacto con la superficie radicular. Este hecho demuestra la importancia del movimiento capilar del agua y de la complementariedad del movimiento del agua y la extensión de las raíces.

La mayor parte de las plantas anuales distribuyen muchas de sus raíces en los primeros 25 – 30 cm del suelo, y permite que absorban la mayor parte del agua en estos horizontes. Muchas plantas perennes,

tales como las uvas y los árboles frutales, tienen raíces que se extienden a mayor profundidad y pueden extraer la humedad de esa parte del perfil del suelo. Pero aun estas plantas dependen, probablemente, del agua que es absorbida por las raíces en los horizontes superficiales cuando está disponible -la situación usual durante el ciclo del cultivo. Cuando el agua no es suficiente algunas plantas tales como la calabaza y el maíz dependerán de sus raíces más profundas en un intento de reemplazar las pérdidas por transpiración.

La relación entre la humedad del suelo y las necesidades de agua de la planta, es el resultado de una compleja interacción entre las condiciones del suelo, los regímenes de precipitación o de irrigación y las necesidades del cultivo. Los agricultores tratan de mantener un balance entre estos componentes durante la estación de cultivo, pero algunas veces los eventos o condiciones ocurren de tal manera, que el balance se inclina hacia los excesos del suelo o las deficiencias en la humedad.

EXCESO DE AGUA EN EL SUELO

Cuando los excesos de agua están presentes en un agroecosistema por un largo tiempo, o el movimiento de los excesos de aguas fuera del sistema es impedido, se presentan las condiciones conocidas como anegamiento (Armstrong 1982). Precipitaciones altas, manejo inadecuado de la irrigación, topografía desfavorable, y un drenaje superficial pobre, puede conducir al anegamiento y a los cambios asociados en el ecosistema del suelo. Los suelos anegados están en todo el mundo, desde los sedimentos aluviales en deltas de ríos hasta las ciénagas, los pantanos y las turberas. Aun los suelos bien drenados pueden experimentar periodos de anegamiento si están sujetos a una estación de inundación.

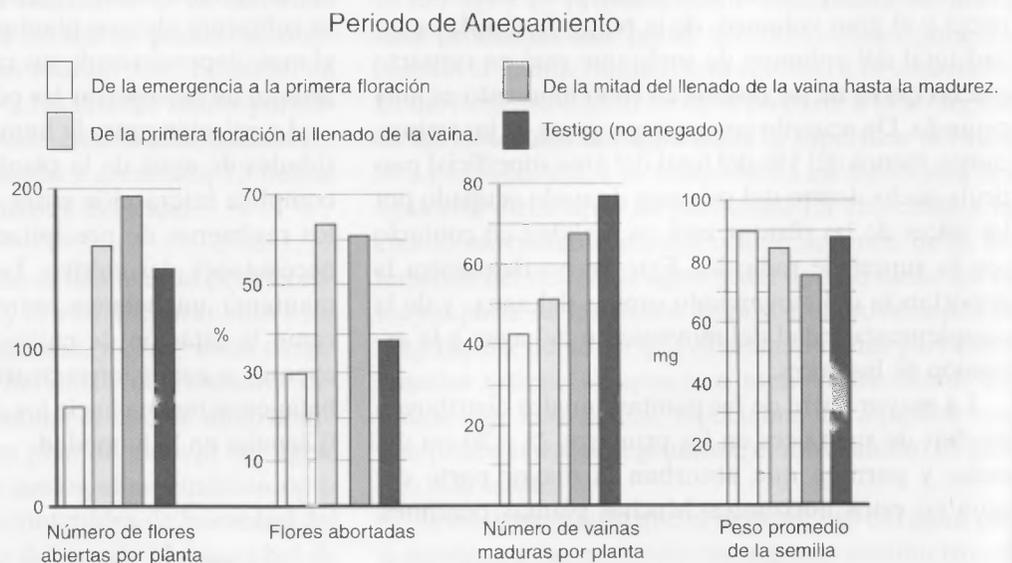
El anegamiento ocurre frecuentemente y es extendido de manera amplia, de tal manera que los sistemas agrícolas alrededor del mundo han desarrollado formas para enfrentar los excesos de agua. Recientemente, esto ha involucrado la construcción de costosas infraestructuras de presas y drenaje. En contraste, las tecnologías simples y tradicionales, tienen el propósito de manejar las condiciones de exceso de humedad más que de eliminarlas. Por ejemplo, en muchas áreas húmedas del mundo, el cultivo del arroz es considerado ideal para una agricultura de áreas inundadas.

Efectos Negativos del Exceso del Agua

En un suelo donde el aire llena los espacios porosos entre las partículas del suelo, la difusión del oxígeno es rápida y raramente hay una deficiencia de O_2 para procesos ecológicos (ejemplo, metabolismo de raíces, actividades de descomposición, etc.). Pero cuando los poros están llenos o saturados con agua, el nivel de difusión del O_2 es muy reducido. Los movimientos del oxígeno en el suelo saturado pueden ser mil veces menor que en el suelo bien aireado. La falta de O_2 puede limitar severamente la respiración de las células de las raíces, permitir el incremento de la población de microorganismos anaeróbicos y establecer condiciones químicas de reducción.

Los niveles menores de intercambio de gas en los suelos inundados pueden también producir CO_2 y otros gases. El CO_2 se acumula donde la respiración ocurre, como en el área de las raíces, desplazando el oxígeno requerido y limitando muchos procesos metabólicos. Otros gases llegan a acumularse bajo las mismas condiciones; por ejemplo, el metano y el etileno pueden incrementarse hasta niveles tóxicos como resultado de la descomposición o división anaeróbica de la materia orgánica. Los productos fitotóxicos solubles en agua de la división de la materia orgánica anaeróbica también se acumulan, un problema que ha sido observado en los sistemas de producción de arroz (Chou 1990).

FIGURA 9.4
Efecto del tiempo de anegamiento sobre los componentes del rendimiento del caupí (Vigna unguiculata).
Datos de Minchin et al. (1978).



Bajo condiciones de suministro limitado de O_2 , muchos microorganismos del suelo hacen uso de otros aceptores de electrones además del oxígeno para la oxidación respiratoria. A raíz de esto, numerosos componentes son convertidos a un estado químico de reducción donde el oxígeno se pierde y se gana hidrógeno. Esto conduce al desbalance en el potencial de óxido-reducción (Redox) del suelo, medido como el potencial eléctrico del suelo para recibir o suministrar electrones. Los iones ferrosos y manganosos (más que férricos o mangánicos) producen niveles tóxicos bajo condiciones de reducción.

Algunos microorganismos tolerantes a la anaerobiosis que pueden usar nitratos como fuente de oxígeno para su respiración, producen denitrificación por la liberación de gas N_2 , a niveles tóxicos de óxido nitroso (N_2O). El amonio también puede producirse después de la inundación, pero esto se debe sobre todo a la división anaeróbica de la materia orgánica. Además, la actividad anaeróbica reduce los sulfatos a sulfitos solubles fitotóxicos, produciendo el olor familiar de huevo podrido de los sulfitos (H_2S).

Cualquiera de las condiciones descritas anteriormente, individuales o en conjunto, pueden limitar el desarrollo de la planta. Cuando la planta está débil por estas condiciones puede ser más susceptible a enfermedades, especialmente en la zona radicular. El tiempo de inundación es también importante. La susceptibilidad de los cultivos a los efectos negativos de los excesos de agua en el suelo, puede depender del estado de desarrollo del cultivo en el momento en que ocurre inundación. Los datos en la Figura 9.4 ilustran cómo el anegamiento puede afectar el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en diferentes formas dependiendo del encharcamiento.

Sistemas de Drenaje

Los sistemas de drenaje han sido empleados por mucho tiempo, para remover los excesos de agua de la zona de enraizamiento de los cultivos y prevenir el anegamiento de las tierras agrícolas. Bajando los niveles de agua o previniendo inundaciones, el ecosistema suelo se mantiene aeróbico, promoviendo sistemas de raíces saludables y estimulando un incremento en los rendimientos. Se sabe que los sistemas de drenaje han sido usados por los agricultores romanos y chinos desde hace casi dos mil años. Una gran

parte del valle del río Yangtze de China, las tierras bajas de Holanda y la región del Delta de California, podrían no ser aptas para la agricultura sin un sistema de drenaje complejo.

Los sistemas de drenaje involucran la construcción de sistemas de drenaje, canales y diques que impiden que las áreas bajas sean inundadas o que el manto freático se mantenga controlado hasta que los cultivos puedan establecerse. En algunos lugares con suelos saturados, se usan montículos y camas elevadas. Recientemente, la humedad del suelo puede controlarse mejor con el desarrollo, de los sistemas de drenaje subsuperficial empleando tubos de plástico perforados, que pueden ser enterrados con maquinarias zanjeadoras especializadas.

Sin embargo, los sistemas de drenaje tienen un costo. Aparte de los costos económicos de instalación y mantenimiento, los sistemas de drenaje tienen costos ecológicos. El agua removida acarrea en sí misma nutrientes y sedimentos que se pierden del sistema y deben ser reemplazados. En áreas de precipitación variable, los excesos de drenaje pueden causar incremento del daño por sequía durante un año seco. En algunas regiones con evapotranspiración alta durante la estación de crecimiento de las plantas y donde los drenajes son usados ampliamente, el dispositivo del drenaje del agua en sí mismo puede ser un problema, especialmente cuando se acarrean residuos de plaguicidas y altos contenidos de sales que pueden dañar ecosistemas naturales cercanos.

Cultivos Adaptados a Humedales

En lugar de tratar el anegamiento como un problema a ser resuelto con sistemas de drenaje u otra infraestructura, este puede ser visto como una oportunidad para el crecimiento de cultivos adaptados para tolerar los encharcamientos. El arroz (*Oryza sativa*) es probablemente el ejemplo más conocido de este tipo de cultivos. Originalmente, una planta acuática o de tierras cenagosas, el arroz ha sido cultivado como una planta que florece en hábitats húmedos. Su adaptación incluye tejidos especiales que pueden tener espacios rellenos de aire en los tallos, que permiten al aire difundirse hacia las raíces, raíces que pueden crecer bajo condiciones de baja concentración de oxígeno, la habilidad para oxidar iones ferrosos a hidróxidos férricos pardo rojizos en la rizosfera y así



FIGURA 9.5
Construyendo un sistema agrícola de campo elevado en un humedal en Tabasco, México. El suelo excavado de los canales laterales es colocado en capas, mezclado con bagazo de caña de azúcar para crear una superficie de siembra elevada.

tolerar suelos con alto potencial redox, y semillas que pueden germinar bajo el agua debido a su bajo requerimiento de oxígeno. Otros cultivos no están completamente adaptados para tierras húmedas, pero tienen adaptaciones que permiten tolerar las inundaciones periódicas. El taro o malanga (*Colocasia esculenta*), por ejemplo, puede tolerar inundaciones debido a su habilidad de almacenar oxígeno en una especie de cormo hinchado en la base de las hojas.

Adaptación a los Excesos de Agua en el Suelo al Nivel de Agroecosistema

Cuando el enfoque agroecológico es aplicado para hacer frente a los excesos de agua, puede adoptarse un enfoque intermedio. Más que tratar de eliminar el agua o restringir la producción a cultivos adaptados a la inundación, pueden usarse varias formas de agricultura tradicional de campos elevados. En áreas con manto freático elevado o con periodos de inundación, pueden ser útiles las variaciones topográficas en el nivel del suelo. Para ello el suelo es excavado para construir camas elevadas y en el proceso se forman drenajes y canales, los cuales pueden servir para el drenaje si entra demasiada agua al sistema en alguna época del año. Sin embargo, el principal propósito de los canales es captar sedimentos erosionados y materia orgánica y, en algunos casos, hacer posible la producción piscícola. En vez de cambiar los niveles del

manto freático, las áreas de cultivos son elevadas sobre el manto freático. Si el sistema es instalado en un área con una estación seca extensa, el movimiento capilar del agua que asciende del manto freático, puede ser suficiente para mantener los cultivos. En algunos casos, el agua de irrigación puede ser traída de canales cercanos. El ejemplo más ampliamente conocido de sistemas de campos elevados son las chinampas del centro de México (descrita con mayor detalle en el Capítulo 6), los sistemas dique-charco del delta del río Perla al sureste de China y los sistemas de campo-canales de Holanda. Muchos de estos agroecosistemas tienen una historia muy larga de manejo exitoso.

DEFICIENCIA DE AGUA EN EL SUELO

Cuando los niveles de humedad del suelo perdidos por la evapotranspiración son mayores que las entradas por la precipitación o el riego, las plantas comienzan a sufrir. La evaporación reduce el suministro de agua en los primeros 15 - 25 cm del suelo, y dependiendo de las características de enraizamiento y los niveles de transpiración de las plantas en el suelo, el agotamiento puede extenderse hasta mayores profundidades si la planta continúa perdiendo agua a la atmósfera por la transpiración. Como la humedad se agota en el suelo, la temperatura de este cerca de la superficie comienza a elevarse, incrementando aún más los niveles de evaporación. Cuando la humedad

ESTUDIO DE CASO

Sistema de Campos Elevados Prehispánicos de Quintana Roo, México

Muchas áreas del mundo dependen de la producción de alimentos en humedales o áreas inundadas periódicamente. Los agricultores en estas áreas se han adaptado a condiciones de humedad excesiva de diferentes maneras, y algunos de los sistemas resultantes son muy productivos. Algunos también son muy antiguos. Estudios recientes indican que los Mayas de la península de Yucatán, desarrollaron hace más de 2 000 años un agroecosistema productivo en humedales, en las tierras bajas de lo que ahora se conoce como el estado de Quintana Roo, México (Gliessman 1991).

Los restos de enormes sistemas de canales y camas elevadas que abarcaban más de 40 000 hectáreas han sido descubiertos y actualmente están siendo estudiados. Estudios muestran que los sistemas de camas y canales fueron construidos aproximadamente 800 años A.C. y fueron usados continuamente por más de 1 000 años. No está muy claro por qué los campos fueron eventualmente abandonados.

Mediante el análisis de los restos de los sistemas, los científicos han podido deducir las técnicas usadas para preparar los canales y las plataformas. Los Mayas cavaron los canales más abajo de la

parte superior del suelo, y formaron las plataformas amontonando el suelo de los canales sobre la superficie entre los canales. Los canales podrían haber sido periódicamente limpiados, permitiendo a los mayas mover el suelo y la materia orgánica que recolectaron en los canales agregándola en la parte alta de las plataformas.

Debido a que el material vegetal se descompone rápidamente en los trópicos, permanece muy poca evidencia para indicar qué tipos de cultivos fueron cultivados en las camas elevadas. También es imposible deducir cuáles eran los patrones de plantación de los Mayas o la frecuencia de la limpieza de los canales.

No obstante, muchos agricultores tradicionales en regiones de tierras bajas de México trabajan con sistemas de canales y camas elevadas actualmente, principalmente en áreas con poblaciones indígenas ancestrales, y es muy posible que esta práctica fuese transmitida de sus ancestros Mayas. Mediante la observación de estos sistemas puede ser posible inferir como la agricultura maya pudo haberse desarrollado. El maíz y el frijol forman las bases de los sistemas de cultivo actuales, y es importante notar que cuando el maíz se desarrolla en estos agroecosistemas adaptados para tierras húmedas, los agricultores logran rendimientos cuatro veces más altos que aquellos de áreas cercanas que han sido desmontados y drenados usando tecnología moderna.



FIGURA 9.6
Campos de oliva en granjas sin riego en Andalucía, España. Este cultivo perenne de enraizamiento profundo, está bien adaptado a regiones con precipitación limitada y de difícil acceso al riego.



FIGURA 9.7

Tierras dañadas por acumulación de sales cerca de Kesterson en el centro de California. El drenaje de las aguas de riego de las tierras agrícolas circundantes y la evaporación dejó sales tóxicas en el suelo.

Foto cortesía de Roberta Jaffe.

de fácil disponibilidad en las partículas del suelo es agotada por estos procesos, los niveles de humedad del suelo pueden alcanzar el punto permanente de marchitez de las plantas.

Si el marchitamiento temporal ocurre consistentemente, las hojas comienzan a amarillarse y el crecimiento y desarrollo, generalmente, es retardado. Las hojas se expanden más lentamente, son más pequeñas y envejecen más rápidamente. Los niveles fotosintéticos declinan en una hoja estresada, y gran cantidad de fotosintatos son asimilados y almacenados en las raíces de las plantas. Desde el punto de vista de producción de cultivos, esta respuesta es usualmente negativa, ya que provoca una reducción en el producto cosechable. Sin embargo, desde una perspectiva ecológica, tal respuesta puede proveer alguna ventaja adaptativa para las plantas. Por ejemplo, el almacenamiento de más carbono en las raíces de una planta estresada puede promover mayor crecimiento de raíces, permitiendo a la planta tomar humedad de un área mayor. El estrés de humedad puede forzar tempranamente a la floración, fructificación y formación de semillas, ayudando a asegurar

la supervivencia de la especie. En algunos casos, los agricultores realmente pueden tomar ventajas de tales respuestas a la sequía, como cuando el agua es contratada de las plantas de algodón a finales del verano, para forzar a una defoliación y evitar la utilización de un defoliador químico antes de la cosecha.

Muchas plantas tienen estructuras específicas o rutas metabólicas que ayudan a su supervivencia bajo condiciones de estrés de humedad. Los agricultores en un área sujeta a estrés de humedad periódico podrían observar las especies cultivadas y variedades que demuestren algunos de estos rasgos adaptativos. Algunos ejemplos de cultivos tolerantes a la sequía son ciertas especies de cactus, garbanzo, ajonjolí, cultivos de nueces tales como el pistacho y ciertos cultivos perennes de enrai-

zamiento profundo como los olivos y los dátiles.

ECOLOGÍA DE LA IRRIGACIÓN

En ecosistemas naturales, la vegetación está adaptada a los regímenes de humedad del suelo que son generados por los tipos de clima y suelo. Por otro lado, en los agroecosistemas, frecuentemente se introducen plantas con necesidades de agua que exceden la disponibilidad de los ecosistemas naturales para suplirlas. Cuando este es el caso, el riego es usado para proveer niveles de humedad adecuados para los cultivos.

La irrigación representa un cambio mayor en la función de los ecosistemas, y genera problemas ecológicos particulares. Al mismo tiempo, los sistemas de suministro de agua son costosos en términos tanto de dinero como de energía. Su uso debe balancear los costos ecológicos y económicos si se quiere alcanzar a largo plazo la sostenibilidad.

La cosecha, el almacenamiento y los sistemas de distribución de agua, pueden tener mayores impactos sobre los flujos de agua tanto superficiales como subterráneos. Los acuíferos pueden ser sobreexplotados

y la ecología de las riveras, las áreas riparias y los ecosistemas de humedales pueden ser severamente dañados. Por lo tanto el mantenimiento de canales y vías de agua saludables, es tan importante como mantener una producción de cultivos redituables, el impacto de los sistemas de suministro de agua sobre la hidrología local y regional debe considerarse.

Acumulación de Sales

Casi toda el agua de riego contiene sales que pueden dañar los cultivos si se deja que se acumulen. Ya que el riego es usado principalmente en áreas con alta evapotranspiración potencial (ET), el depósito de sales en la superficie del suelo es inevitable con el tiempo. Tal acumulación, si no se controla, puede alcanzar niveles desfavorables para la producción de cultivos, especialmente cuando las sales contienen trazas de elementos tóxicos tales como el boro y el selenio. El contenido total de sales es medido por la conductividad eléctrica en μmhos . Por cada 1,0 milimhos por cm de agua de riego aplicada, el contenido de sales del agua se incrementa alrededor de 640 ppm. Un monitoreo cuidadoso de los niveles de sales en suelos irrigados, analizando los contenidos de sales del agua de riego que entra, puede ayudar a evitar la acumulación excesiva.

Dado que es inevitable la acumulación de sales en la mayor parte de los sistemas de riego, la sostenibilidad a largo plazo no es posible sin un drenaje adecuado ya sea natural o artificial, que remueva las sales acumuladas de las capas superiores del suelo. La lluvia es el agente natural primario de lavado. En ausencia de precipitación suficiente, es necesario construir sistemas de drenaje, diques y canales como se describió antes. El exceso de agua de riego es aplicado periódicamente para disolver las sales, así el agua cargada de sales puede ser lavada más abajo de la zona de raíces productivas o ser removida mediante el drenaje superficial del campo de cultivo.

Una consecuencia natural del trabajo agrícola en áreas secas, donde la ET es alta y el agua de riego acarrea cantidades significa-

tiva de sales, es que el agua saliente del agroecosistema tendrá una concentración de sal mayor que el agua que se aplicó. Por ello se deben considerar cuidados especiales para no salinizar las áreas que reciben las aguas de salida, ya sean suelos, acuíferos subterráneos o sistemas de agua superficial.

Cambios Ecológicos

La entrada de agua de riego, en una región agrícola durante una época del año normalmente seca, puede tener efectos profundos sobre los ciclos ecológicos naturales y los ciclos de vida, tanto de organismos benéficos como perjudiciales. Bajo condiciones naturales, la sequía estacional puede ser un medio muy importante para reducir la presencia de plagas y enfermedades, actuando tal como el frío o la inundación lo hacen en otras regiones, para romper los ciclos de vida de esos organismos. Las pérdidas de los mecanismos de control natural pueden tener serias consecuencias en términos de epidemias y de incremento de resistencia a estrategias de control no natural.

Otro tipo de cambio que puede resultar al introducir riego en áreas naturalmente secas, son los cambios climáticos locales o regionales causados por el incremento de la evaporación de áreas de almacenamiento de agua superficial, o de campos de cultivo donde el agua es aplicada. La humedad elevada en la atmósfera puede estar relacionada al incremento de problemas de plagas y enfermedades, y también pue-

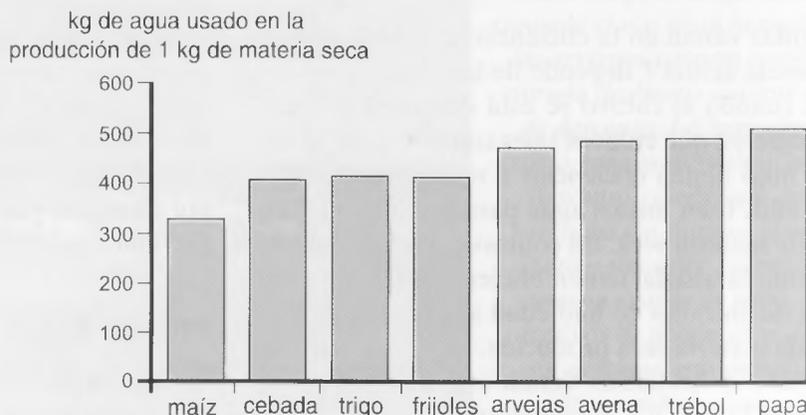


FIGURA 9.8
Promedio de eficiencia de transpiración de diversas plantas cultivadas. Los promedios fueron calculados a partir de datos compilados por Lyon et al. (1952) de varios lugares del mundo.

de estar asociada con las alteraciones en la distribución y cantidad de precipitación. Los efectos del riego fuera de la granja deben ser considerados junto con sus efectos dentro de ella, cuando se aplica un contexto más amplio de sostenibilidad.

OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL RECURSO AGUA

La humedad del suelo es manejada óptimamente en agroecosistemas diseñados para asegurar que la ruta primaria de salida del agua del suelo sea mediante el cultivo. El enfoque para el manejo, es por tanto, reducir la evaporación e incrementar los flujos mediante la transpiración. Las prácticas agrícolas que benefician este movimiento de agua diferencial son importantes componentes de la sostenibilidad.

Eficiencia de Uso del Agua

La biomasa producida por una planta con una cantidad dada de agua puede ser usada como medida de la eficiencia del uso del agua aplicada en un agroecosistema. Cuando esta eficiencia es expresada como materia seca producida por unidad de agua transpirada se llama eficiencia de transpiración (T), y cuando es calculada sobre la base de la materia seca producida por unidad de agua perdida, a través tanto de la evaporación de la superficie del suelo como de la transpiración, se llama eficiencia de evapotranspiración (ET).

Eficiencia de Transpiración

Las plantas varían en la eficiencia relativa T, aunque la eficiencia actual T depende de las condiciones que existan cuando el cultivo se está desarrollando. Los datos sugieren que cultivos tales como el maíz, el sorgo y el mijo tienen eficiencias T relativamente altas, ya que ellos usan menos agua para producir un kilogramo de materia seca. En contraste, las leguminosas tales como la alfalfa, tienen eficiencias T bajas y dependen de entradas de humedad altas por cada kilogramo de materia seca producida. La mayor parte de los cereales y hortalizas tienen eficiencias T intermedias. En la Figura 9.8 se muestran eficiencias T promedio para algunos cultivos importantes.

Se requiere gran cantidad de agua para llevar una planta cultivada hasta su madurez. Por ejemplo, un cultivo representativo de maíz que contenga 10 000

kg por hectárea de materia seca y que tenga un nivel de transpiración de 350, podría absorber el equivalente a 35 cm de agua por hectárea. Esta humedad debe de estar en el suelo en el momento en que la planta la necesita o el crecimiento sufrirá. Al agregar las pérdidas por evaporación, podemos ver cómo esta es frecuentemente el principal factor crítico para la producción en regiones con humedad limitada.

Las investigaciones en el incremento de la eficiencia T de los cultivos han obtenido muy poco éxito. En todo caso, los cambios de manejo o el esfuerzo de hibridación de plantas, han tenido poco éxito en la alteración del nivel de eficiencia. Sin que otras condiciones sean limitantes, la cantidad de agua necesaria para producir una unidad de materia seca de una especie o variedad de cultivo en un clima dado, es relativamente constante. Esto podría sugerir que puede ganarse más enfocándonos en el control de la evaporación de la superficie del suelo.

Eficiencia de Evapotranspiración

Debido a que el suelo es ampliamente variable, la eficiencia ET también es extremadamente variable. No obstante, mediante cambios en las prácticas de manejo del suelo y del cultivo que afecten la evaporación de agua del suelo, como se describe más adelante, se pueden obtener fácilmente cambios deseables en la eficiencia ET. Idealmente, el nivel de pérdida de agua por transpiración con respecto a la pérdida de agua por evaporación debe ser lo más alta posible. Una T más alta, con respecto al nivel de ET, indica mayor movimiento de agua a través de la planta y en consecuencia, un potencial más alto de producción de biomasa de la planta por unidad de agua usada. El manejo sostenible del agua otorga mayor énfasis, entonces, a la reducción de E, así como a mantener mayor humedad para ET y los procesos relacionados al crecimiento y desarrollo de la planta.

Manejo de la Evapotranspiración

Ya que la transpiración es un proceso de la planta que está sujeto a un control menor cuando está creciendo normalmente, entonces es mejor enfocarse sobre la reducción de las pérdidas por evaporación, mediante el manejo de la forma en que las plantas se desarrollan.

Elección de Cultivos y Diseño de Agroecosistemas

La elección de especies vegetales y el tiempo de cultivo pueden influenciar tanto la eficiencia T como la ET. Escoger un cultivo con necesidades de agua menos intensas, tales como el maíz o el sorgo, en un área con muy alta evapotranspiración y agua limitada para el riego, es una buena estrategia para el manejo de la humedad del suelo. También puede ser útil hacer la siembra de cultivos con mayores requerimientos de agua en épocas frías del año, cuando el potencial de pérdida de humedad es menor.

Las grandes coberturas vegetales pueden reducir la evaporación dramáticamente. Una forma de obtener mayor cobertura es el uso de técnicas de cultivo intercalado. Una plantación forestal, por ejemplo, sombrea la superficie del suelo, por otro lado, un huerto de manzanas con líneas de árboles ampliamente separadas tiene mucho más superficie evaporativa de suelo expuesta. Pero un incremento en la cobertura con plantas con alto índice de transpiración puede ser un riesgo en regiones más secas, ya que los niveles más bajos de evaporación pueden ser compensados por niveles muchos más altos de transpiración, reduciendo las reservas de humedad del suelo más rápidamente.



Cultivos con Descanso

En lugares con humedad limitada tales como las grandes planicies de los Estados Unidos y el sureste del cinturón trígero de Australia, los agricultores algunas veces alternan cultivos un año y dejan la tierra en descanso el siguiente para conservar la humedad del suelo. La eliminación de las pérdidas por transpiración del cultivo durante el año de descanso, permite que la humedad del suelo sea almacenada para el año de cultivo. El rastrojo del cultivo previo es usualmente dejado sobre la superficie del suelo durante el año de descanso para limitar las pérdidas por evaporación y entonces, alguna clase de labranza del suelo o tratamiento con herbicidas es usado durante la estación de descanso, para minimizar las pérdidas por transpiración de las arvenses. Alternativamente se siembra pasto hacia el fin del año de cultivo y se deja como cobertura durante el año de descanso. Aunque las bajas precipitaciones durante el año de descanso pueden causar bajos rendimientos durante el año de cultivo, el cultivo sembrado después del descanso tendrá generalmente un rendimiento más alto que aquel que fue plantado sin dejar el descanso. De hecho, entre mayor sea la precipitación, suficiente para la recarga recibida durante el año de descanso, habrá mucho menos riesgo de pérdida si el turno estacional de cultivo atraviesa un año seco.

FIGURA 9.9

Ovejas pastando durante el año de descanso en una granja australiana de trigo. La oveja controla el uso de la humedad por las arvenses y sirven como una entrada de dinero durante el año de descanso. La humedad del suelo ganada durante el año de descanso, combinada con la precipitación durante el año de cultivo siguiente, permite una cosecha exitosa de trigo. Años sucesivos de producción de trigo sin descanso son imposibles, excepto cuando hay una inusual precipitación alta. Foto cortesía de David Dumaresq.



FIGURA 9.10

Cobertura de jacinto de agua entre líneas de chile, en Tabasco, México.

Manejo de la Evaporación Superficial

La evaporación directa de la superficie del suelo normalmente retorna a la atmósfera más de la mitad de la humedad obtenida de la precipitación. Este grado de pérdidas por evaporación ocurren no sólo en regiones secas, sino también en regiones áridas bajo riego y en regiones húmedas con alta precipitación. Como resultado de las pérdidas de humedad por la evaporación superficial el crecimiento de las plantas es afectado. Cualquier práctica que cubra al suelo ayudará en la reducción de las pérdidas por evaporación.

Coberturas Orgánicas Un amplio ámbito de plantas y materiales animales pueden ser usados para cubrir la superficie del suelo como cobertura para reducir la evaporación (y para reducir el crecimiento de arvenas y las pérdidas por transpiración de éstas). Los materiales comúnmente usados incluyen aserrín, hojas, paja, compost de desechos agrícolas, estiércoles y residuos de cultivo. Las coberturas proveen una barrera muy efectiva para la pérdida de humedad, y son usadas especialmente en jardinería intensiva y sistemas de pequeñas granjas, o con cultivos de alto valor tales como: las fresas, las zarzadoras y algunos otros

cultivos frutales. Las coberturas trabajan mejor cuando los sistemas de producción requieren sólo cultivos poco frecuentes, o aquellos sistemas en los cuales se utiliza la deshierba manual.

El uso del cobertura provee una opción viable para el manejo del suelo y del agua, pero al mismo tiempo tiene muchos otros efectos benéficos. Protege el suelo de la erosión, provee de materia orgánica y nutrimentos al suelo, altera la superficie de reflectividad (albedo), incrementa los límites de capas de difusión gaseosa y aumenta la absorción de la precipitación. Todos estos factores interactúan.

Coberturas Artificiales Una gran cantidad de papeles y plásticos manufacturados están disponibles para usarse como cobertura. Tales materiales

deben ser fácilmente extendidos y firmemente asegurados sobre la superficie del suelo. Cuando estas coberturas son extendidas directamente sobre las camas de siembra, se deben de practicar incisiones u hoyos para que las plantas cultivadas puedan crecer. La pérdida de humedad se reduce mucho y los rendimientos de campo muy frecuentemente se incrementan. Algunos plásticos también proveen un efecto de invernadero concentrado, incrementando la temperatura del suelo varios grados, esto es un beneficio muy importante para cultivos que son plantados durante la época fría del año, tal como la fresa en la costa de California.

Residuos de Cultivo y Labranza Reducida. Dejando un alto porcentaje de los residuos del cultivo anterior sobre la superficie del suelo, se crea una barrera protectora que reduce la evaporación. La cobertura de residuos protege las capas superiores de la superficie del suelo, y provee una barrera contra el flujo capilar de agua hacia la superficie. La temperatura más baja creada por la barrera de la cobertura probablemente ayuda a reducir también la evaporación.



FIGURA 9.11

Cobertura de corteza de Sequoia sobre la parte alta de camas de fresa cerca de Aromas, California.



FIGURA 9.12

Cobertura plástica sobre camas de fresas en la costa de California. El plástico es colocado después que las pequeñas plantas de fresas son trasplantadas, con cortes en el plástico para que las plantas puedan salir.

La labranza reducida y las técnicas de cero labranza son frecuentemente combinadas con el uso de residuos de cultivos como cobertura. La principal meta de la mayor parte de los sistemas de labranza reducida es desarrollar coberturas de suelo más grande para reducir las pérdidas por evaporación de la superficie. En sistemas de cero labranza, las semillas son sembradas directamente dentro del césped o bajo los residuos del cultivo previo sin afectar el suelo, permitiendo que el material de las plantas permanezca como una barrera contra las pérdidas por evaporación. La utilización de los rastrojos como cobertura es una práctica común en áreas subhúmedas y semiáridas, donde hay suficiente biomasa producida por el cultivo previo para

proveer suficiente cobertura del suelo. Los residuos son picados o cortados, esparcidos uniformemente sobre la superficie y entonces, con implementos de labranza especiales que pueden penetrar la cobertura, se planta el cultivo siguiente. Dejando a un lado su impacto positivo sobre la reducción de las pérdidas de humedad del suelo, los sistemas de labranza tienen un inconveniente potencial. Este incluye un incremento de la dependencia de los herbicidas para el manejo de las arvenses, una acumulación de patógenos del suelo de los residuos de cultivo, y requiere de un equipamiento más complejo y costoso en la granja.

Cobertura de Suelo. Una cobertura natural de suelo, hecha de capas de suelo seco cultivado sobre la superficie del suelo, puede conservar la humedad en regiones con una alternancia entre las estaciones húmedas y secas. Esta capa seca rompe el flujo capilar del agua hacia la superficie, y el proceso para hacerlo elimina arvenses que podrían captar la humedad debajo de la capa seca e incrementar las pérdidas por transpiración. No obstante, estos beneficios, deben ser sopesados contra el impacto potencial negativo como: el incremento de los costos del cultivo, una mayor amenaza de erosión de suelo por el viento y la pérdida de la materia orgánica de la capa seca.

Investigaciones Futuras

Cuando la sostenibilidad es la meta principal, la humedad en el suelo es manejada de tal forma que permanezca lo más cerca posible al óptimo requerido para el mantenimiento del mejor desarrollo y crecimiento del cultivo. Esto significa que debemos de ir más allá de la simple remoción de agua cuando ésta se encuentre en exceso, y la adición cuando ésta es deficiente. La sostenibilidad requiere de un entendimiento profundo de cómo el agua funciona en el suelo y sobre la interfase suelo-planta. La eficiencia de la toma de agua y su conversión a biomasa de la planta puede ser un indicador de sostenibilidad del agroecosistema. Se requiere un mayor desarrollo y evaluación de estrategias de manejo del agua, especialmente aquellas que contemplan al agua en el contexto de grandes ciclos y patrones que relacionan a la granja con el ambiente circundante del cual el agua viene y al cual, a final de cuentas, va a retornar pasando a través de la granja.

Ideas para Meditar

1. En regiones con precipitación deficiente, la falta de humedad del suelo para la producción de cultivo puede ser enfrentada de dos formas: (1) Desarrollando cultivos o sistemas de cultivos que estén adaptados a bajos niveles de humedad, o (2) Introduciendo riego para subsanar el déficit de agua ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de cada enfoque?
2. ¿Cuáles son algunas de las razones por las cuales los agricultores deben ser cuidadosos de los efectos "aguas abajo" del uso de riego?
3. Un periodo sin suficiente cantidad de precipitación que crea un estrés de humedad en el suelo, o un periodo de anegamiento largo que cree condiciones limitantes de anaerobiosis en el ecosistema del suelo, puede ayudar a controlar poblaciones de plagas y enfermedades en el suelo que podrían de otra manera causar pérdidas en los cultivos. Cuando estos eventos naturales son removidos de un sistema particular de suelo, ¿qué estrategias del manejo alternativo para plagas y enfermedades podrían emplearse?

Lecturas Recomendadas

Brady, N.C. and R.R. Weil. 1996. *The Nature and Properties of Soils*. Eleventh Edition. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ.

La más reciente edición de este libro de texto sobre suelos, con una sección muy extensa de cómo funciona el agua en el ecosistema suelo.

Marshall, T.J., J.W. Holmes, and C.W. Rose. 1996. *Soil Physics*. Third edition. Cambridge University Press: New York.

Un libro de texto enfocado sobre el entendimiento de la interacción entre el agua y el suelo a través de la física.

McBride, M. B. 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press: New York.

Explicación de los aspectos químicos del suelo con énfasis sobre los impactos humanos y el manejo de los factores ambientales; muestra cómo el agua es un medio importante para mucha de la actividad química del suelo.

Singer, M. J., and D. J. Munns. 1987. *Soils: An introduction*. Macmillan: New York.

Un texto introductorio muy útil sobre suelos, con un muy buen tratado especial sobre el manejo de la interfase suelo-agua.

Slayter R. O. 1967. *Plant Water Relationships*. Academic Press: New York.

Un tratado extensivo de la interfase planta-agua, con un énfasis sobre la ecología fisiológica de las plantas.

Stewart, R. C. and D. R. Nielsen (eds). 1990. *Irrigation of Agricultural Crops*. American Society of Agronomy: Madison, WI.

Una revisión muy detallada realizada por expertos en riego agrícola, que cubre aspectos que incluyen impactos ecológicos, eficiencia del uso del agua y tecnología disponible.

Thorne, D. W., and M. D. Thorne. 1979. *Soil, Water and Crop Production*. AVI Publishing Company: Westport, CT.

Un análisis de cómo la producción de cultivos es afectada por el manejo de la interfase suelo-agua.

FUEGO

Casi toda la vegetación del planeta ha estado afectada de alguna manera por el fuego. Se considera que los fuegos periódicos de frecuencia e intensidad variables se presentan en la mayoría de los ecosistemas, especialmente en regiones con estaciones secas muy marcadas. El fuego es una de las formas más importantes de cambio o perturbación ambiental. El fuego acaba con especies vegetales dominantes, moviliza a los animales, regresa nutrientes al suelo y consume la hojarasca acumulada en el piso de los bosques.

Los fuegos más comunes son de origen natural, pero los fuegos antropogénicos (inducidos por el ser humano) tienen también una historia considerable. Hay reportes en la literatura de depósitos de carbón en áreas boscosas tropicales lluviosas que se remontan a más de 6 000 años, muchos de los cuales parecen estar asociados con la actividad humana. Antes del desarrollo de las primeras herramientas agrícolas, el fuego pudo haber constituido la "herramienta" que los primeros pobladores tuvieron para el manejo de la vegetación.

Algunos tipos naturales de vegetación que han evolucionado en áreas donde el fuego es relativamente frecuente, dependen del fuego para lograr su estabilidad en el largo plazo; estos tipos incluyen ciertas clases de pastizales, sabana, chaparrales y bosques. El chaparral es probablemente la vegetación más conocida por su dependencia del fuego, descrita generalmente

como una comunidad "clímax por fuego".

En las primeras investigaciones ecológicas, no se estudiaba mucho al fuego porque se le consideraba únicamente como una fuerza destructiva, y porque era difícil observar sus efectos reales. Sin embargo, más recientemente, los estudios detallados del fuego en los ecosistemas como el chaparral de California, han ayudado a considerar al fuego como un tema importante en la investigación ecológica. Actualmente, el fuego es considerado como una parte integral de muchos ecosistemas, tal como lo demuestra el incremento en el uso de quemadas controladas en el manejo de parques y reservas naturales. El fuego también juega papeles muy importantes en los agro-



FIGURA 10.1

Fuego en un Chaparral en las montañas de Santa Ynez cerca de Santa Barbara, CA. Los fuegos periódicos son parte de la historia evolutiva del Chaparral; el ser humano ha perturbado recientemente los patrones naturales de la quema.

cosistemas: es parte imprescindible de la práctica de la agricultura trashumante, y se utiliza para manejar residuos de cultivos, control de arvenses y eliminar los troncos dejados después de tumar los árboles.

EL FUEGO EN LOS ECOSISTEMAS NATURALES

El fuego se puede presentar en un ecosistema cuando se cumplen tres condiciones: acumulación de suficiente combustible o materia orgánica, clima seco y una fuente de chispa. Por millones de años, los relámpagos fueron la principal fuente de chispa. Aún son importantes en nuestros días, como lo demuestra el hecho de que más del 70% de los fuegos no controlados en el oeste de EE.UU. son causados por relámpagos. En tiempos geológicos muy recientes, la humanidad se ha convertido en la fuente primaria de ignición o chispa. El ser humano ha utilizado el fuego desde el Paleolítico, hace aproximadamente 500 000 años. Probablemente, el fuego se usó por primera vez para la cacería y el movimiento de animales, para evolucionar posteriormente como herramienta de manejo de vegetación. La quema pudo haber sido uti-

lizada para proporcionar mejores alimentos a los animales, o aún para promover la presencia de cierto tipo de plantas que sirvieran como fuente de alimento para los seres humanos. Eventualmente, el fuego se convertiría en una herramienta para preparar la superficie para la siembra, con evidencias que demuestran que la agricultura primitiva de roza-tumba-quema comenzó hace aproximadamente 10 000 años.

Desde una perspectiva ecológica, existen fundamentalmente tres tipos de fuegos:

- **Fuego Superficial.** Este es el tipo más común de fuego. Las temperaturas del mismo no son demasiado altas, con flamas que queman la basura, el pasto o la hojarasca que se ha acumulado sobre la superficie del suelo. Este tipo de fuego se puede mover bajo una copa forestal y no tocar a los árboles. Los cambios que ocurren en las condiciones del suelo durante un fuego superficial son generalmente de poca duración, aunque la vegetación de los estratos inferiores puede ser sustancialmente alterada. Los fuegos superficiales pueden ser utilizados ya sea para controlar o promover el creci-



FIGURA 10.2

Los tres tipos de fuego. Un fuego de movimiento lento y superficie fresca (izquierda) quema la hojarasca bajo las capas de un bosque deciduo en verano en el noroeste de Costa Rica. Al centro, un fuego de corona de mayor velocidad en Chaparral quema todo a su paso, desde la superficie hasta las coronas de las plantas cerca de Santa Barbara, CA. Un fuego bajo superficie (derecha), visible a la distancia, arde en un pantano cerca de Coutzacalcos, Veracruz, México.

miento de vegetación arvense o invasora, dependiendo de las circunstancias.

- **Fuego de Corona.** Este tipo de fuego puede ser muy perjudicial para algunos tipos de vegetación, pero al tiempo puede ser una parte integral del rejuvenecimiento de otras. Durante este tipo de fuegos, la copa de la vegetación es consumida y habitualmente las especies vegetales maduras son destruidas. Los fuegos de corona son generalmente muy móviles y con frecuencia se combinan con un fuego superficial para quemar todo sobre la superficie del suelo.
- **Fuego Subterráneo o de Subsuelo.** Este tipo de fuego no es muy frecuente, pero cuando se presenta puede ser extremadamente destructivo. Es característico de suelos que son ricos en materia orgánica, especialmente suelos de turba. La materia orgánica en el suelo puede quemarse hasta el horizonte mineral del suelo. Estos son generalmente fuegos lentos, con más humo que llamas y que secan el suelo conforme avanzan. Las raíces y semillas son destruidas y los hábitats de los animales son severamente alterados.

Cualquier fuego individual puede combinar aspectos de los tres tipos de fuego. En general, la intensidad de un fuego está muy relacionada con la frecuencia de fuegos en el área.

EFFECTOS DEL FUEGO SOBRE EL SUELO

Mucho del significado ecológico del fuego gira en torno a sus efectos sobre el suelo. El fuego tiene impactos muy notorios en un rango de componentes bióticos y abióticos del ecosistema suelo, y es importante el conocimiento de estos impactos al emplear el fuego como una herramienta para el manejo de los agroecosistemas. Sin embargo, debe notarse que los efectos del fuego variarán mucho dependiendo del tipo y etapa de desarrollo de la vegetación, del tipo de suelo, de la época de la quema, de las condiciones climáticas prevalecientes, del tiempo transcurrido desde el fuego previo y de otras condiciones.

Factores Abióticos

Cuando sucede un fuego, la temperatura de los horizontes superficiales del suelo se incrementa. La tasa

de calentamiento y profundidad reales dependen de la cantidad de humedad en el suelo y del tipo de fuego. Las temperaturas durante una quema en la superficie del suelo casi siempre rebasan los 100 °C y pueden ser tan altas como los 720 °C por períodos breves de tiempo. Los aumentos en la temperatura bajo la superficie se restringen comúnmente a los primeros 3-4 cm del suelo, donde aumentan 50-80 °C sobre la temperatura antes del fuego, generalmente por sólo unos pocos minutos (Raison 1979). Estas temperaturas son suficientemente altas para modificar el ambiente del suelo en formas que pueden ser útiles para el manejo del agroecosistema.

La combustión completa de la materia orgánica sobre la superficie del suelo incinera la mayoría del nitrógeno y componentes de ácidos orgánicos, regresando cationes inorgánicos al suelo (esencialmente K^+ y Ca^{2+}) los cuales tienen en consecuencia un efecto alcalinizante. La potencia de este efecto depende de la intensidad del fuego y si se completó la combustión de la biomasa vegetal, pero algunos aumentos de hasta tres o más unidades de pH en el suelo, son factibles durante los primeros días posteriores al fuego, especialmente una vez que el suelo es humedecido por la lluvia.

Después del fuego, la superficie del suelo ennegrecida tiende a ganar más radiación solar; no obstante, si la biomasa vegetal en pie era considerable antes del fuego y las temperaturas de la quema fueron muy altas, podría haber suficiente ceniza blanca sobre la superficie para tener en realidad el efecto contrario por un corto tiempo. El mayor albedo de la superficie blanca reflejará la energía solar y limitará el calentamiento del suelo.

Las temperaturas altas provocadas por el fuego pueden reducir considerablemente la cantidad de materia orgánica en las capas superficiales del suelo. A una temperatura de 200-300 °C durante 20-30 minutos hay una reducción de 85% en la materia orgánica, con la consecuente liberación de CO_2 , pérdida de nitrógeno y azufre en forma volátil y el depósito de minerales.

Después del fuego, hay generalmente una disminución en la capacidad de retención de humedad del suelo, aunque con la remoción de la cobertura vegetal, la disponibilidad real de humedad en el suelo puede aumentar debido a una menor demanda. Se reduce el tamaño de los agregados del suelo, aumenta

la densidad aparente y se reduce también la permeabilidad y la tasa de infiltración de agua. Con frecuencia hay también un aumento en la escorrentía pluvial y la lixiviación de nutrientes y la posibilidad de mayor erosión edáfica, hasta que el suelo sea cubierto nuevamente con vegetación. No es extraño que justo después del fuego la superficie inmediata de este se vuelva repelente al agua, condición que habitualmente se supera luego de una corta exposición a la humedad.

En términos generales, la mayor parte de los efectos señalados anteriormente tienen corta duración. La regeneración de la vegetación, unida al reemplazo de la materia orgánica del suelo, la lluvia percolada y la modificación vegetal de las condiciones quemadas, comienzan rápidamente el proceso de recuperación. En caso de severa intensidad del fuego, seguido de la supresión excesiva de este y la acumulación anormal de biomasa (combustible), o en el caso de la quema de capas orgánicas gruesas de turba que se acumulan lentamente, las condiciones abióticas pueden ser alteradas por largos períodos de tiempo. Los fuegos frecuentes no naturales, comúnmente inducidos por el ser humano, pueden también conducir a cambios más prolongados.

Factores Bióticos

Evidentemente todos los animales o plantas atrapados en la ruta del fuego están en serio peligro. Las plantas que no están adaptadas al fuego son fácilmente destruidas, especialmente si el tipo de corteza no protege su parte interior viviente. Si el fuego es lo suficientemente caliente y otras condiciones son las apropiadas, la materia vegetal viva es eliminada, secada e incinerada rápidamente, reduciendo todo el material aéreo a cenizas. Así pues, si las plantas no retoñan de estructuras subterráneas, la recuperación sólo podrá darse por la germinación de semillas. Las semillas de algunas especies de plantas son eliminadas por el fuego, mientras que otras son

estimuladas por el rompimiento de los factores de la dormancia específica, o por la creación de condiciones del suelo que favorecen la germinación y el establecimiento.

Los fuegos continuos pueden retrasar el proceso de recuperación de la vegetación a tal grado que otro tipo de vegetación, más tolerante al fuego, podría establecer su dominancia. La conversión de arbustivos a pastizales es un buen ejemplo de este proceso. Por otro lado, algunos tipos de vegetación son, en cierto sentido, mantenidos "saludables" gracias a los fuegos periódicos, debido a que el fuego elimina individuos viejos o decadentes, repone al suelo los nutrientes almacenados, y estimula la renovación de individuos nuevos o más jóvenes.

Algunos animales mayores pueden evitar el fuego alejándose de él, pero aún cuando no mueren por el fuego, sus poblaciones en el área quemada pueden recuperarse mediante la recolonización a partir de áreas aledañas no quemadas. Algunas especies animales de hecho buscan áreas recientemente quemadas debido a la concentración de nuevos rebrotes y forraje para alimentarse, o también porque las cenizas pueden ayudarles a deshacerse de parásitos como las garrapatas y las pulgas.



FIGURA 10.3

La respuesta de los pinos al fuego. Algunos pinos jóvenes (para vivero casero) se restablecen después de devastadores fuegos de corona que eliminaron los árboles padres en Yellowstone, Wyoming.

Después de un fuego hay una reducción inmediata en las poblaciones de casi todos los organismos que habitan el suelo, incluyendo hongos, bacterias nitrificantes, arañas, miriápodos y lombrices de tierra. Muchos de éstos mueren como consecuencia de las altas temperaturas, pero algunos organismos son afectados por los cambios del pH que siguen al fuego, o por la descarga de ciertos nutrimentos al suelo que provienen de la materia orgánica incinerada. Sin embargo, después del fuego hay una recolonización relativamente rápida, especialmente de bacterias, las cuales son estimuladas por el aumento en el pH del suelo.

En general, el fuego puede tener efectos tanto negativos como positivos sobre el ambiente, pero de cualquier forma se debe recordar que la intensidad, duración y frecuencia de los fuegos en ecosistemas naturales son increíblemente variables. De un año a otro, las condiciones que favorecen los fuegos variarían enormemente. Y cuando un fuego se presenta, sus efectos no serán uniformes. Algunas áreas se quemarán casi completamente, mientras que, a poca distancia, el mismo tipo de vegetación podría haber amortiguado los efectos del fuego completamente.

ADAPTACIONES DE LAS PLANTAS AL FUEGO

En cualquier sitio donde el fuego tenga una larga historia evolutiva, la mayoría de las plantas y al menos algunos de los animales habrán desarrollado adaptaciones al fuego. Es interesante que las adaptaciones que hacen a las plantas resistentes al fuego son, en muchos casos, también características que les permiten alternar con luz excesiva o estrés por sequía.

Las plantas pueden adaptarse al fuego en tres formas diferentes.

- **Resistencia al fuego.** Las plantas con resistencia al fuego tienen atributos que ayudan a prevenir que las partes vivas de la planta sean quemadas por el fuego. Estos atributos incluyen características como corteza gruesa, follaje resistente al fuego, o un manto de hojarasca que soportará fuegos frecuentes pero menos dañinos.
- **Tolerancia al fuego.** Las plantas tolerantes al fuego poseen características que permiten que la planta sobreviva a ser quemada por el fuego. Un atributo de tolerancia al fuego muy común es la capacidad de rebrotar a partir de la corona después de un fuego.

- **Dependencia al fuego.** Las plantas dependientes del fuego requieren del fuego para reproducirse o sobrevivir en el largo plazo. Algunas plantas de este tipo tienen semillas que necesitan fuego para poder germinar, o poseen conos (frutos) que no se abrirán a menos que hayan estado expuestos al fuego. Otras plantas dependientes del fuego no florecerán sino hasta después de un fuego, o se volverán senescentes a menos que sean expuestas a fuegos periódicos.

EL FUEGO EN LOS AGROECOSISTEMAS

El fuego tiene una larguísima historia de uso en la agricultura. No obstante, desde una perspectiva agroecológica, pueden existir fuegos buenos y malos, sobre o sub-utilización del fuego y utilización cautelosa o descuidada del mismo. El reto es la aplicación apropiada del conocimiento de los impactos ecológicos del fuego.

Agricultura Trashumante

El agroecosistema con la historia de uso de fuego más larga es la agricultura trashumante, o de roza-tumba-quema. La agricultura trashumante con el uso del fuego sigue siendo la forma más importante de agricultura de subsistencia en muchas partes del mundo. Aunque se pensaba que era practicada originalmente en las regiones tropicales, la agricultura trashumante con uso de fuego fue utilizada aun en la producción agrícola primitiva de Europa, donde el trigo y la cebada eran cultivados en períodos de barbecho en ciclos de 10 a 25 años (Russell 1968). Aunque pareciera muy sencillo rozar, quemar y plantar, los campesinos que desarrollan este tipo de agricultura han aprendido a través de la experiencia que la programación a tiempo de todas las actividades, especialmente la quema, hace la diferencia entre un sistema sostenible y uno degradante. La agricultura trashumante funciona bien cuando se da suficiente tiempo al sistema para que los procesos de sucesión naturales, repongan la fertilidad del suelo que se perdió por la perturbación y la cosecha del cultivo.

Inmediatamente después de un fuego, la movilidad de los nutrimentos en el sistema es muy grande, lo que frecuentemente provoca pérdidas muy grandes por lixiviación muy alta. Esto acentúa la necesi-



FIGURA 10.4
Manejo del fuego en un
agroecosistema de roza-tumba-
quema en Tabasco, México.
Una pequeña guardarraya
separa al fuego de la roza futura
y los cultivos aledaños.

dad de un período de barbecho con el objeto de recuperar la fertilidad perdida. Los cultivos en los sistemas de roza-tumba-quema necesitan absorber los nutrientes agregados al suelo a partir de las cenizas, o de otra forma, la lixiviación los movilizará fuera de su alcance, o las especies de plantas no cultivadas (arvenses) empezarán a capturarlos. La tasa de pérdida de nutrientes varía considerablemente dependiendo del tipo de suelo, los regímenes climáticos, y las prácticas de cultivo. Sin embargo, algunos estudios han demostrado que las pérdidas pueden ser rápidas y grandes, especialmente para nutrientes como el calcio, potasio y magnesio (Ewel *et al.* 1981, Jordan 1985, Nye y Greenland 1960). Los fuegos continuos en sucesiones cortas, así como el cultivo del suelo, pueden acelerar aún más las pérdidas de nutrientes (Sánchez 1976).

Se considera que los sistemas de agricultura trashumante son capaces de mantener niveles relativamente bajos de población humana. En sistemas agrícolas trashumantes bien manejados, la mayor parte del carbono y nitrógeno del suelo permanece después de un fuego, la red radicular se mantiene intacta y viva, la superficie del suelo es protegida por alguna forma de biomasa y aún las micorrizas del suelo logran sobrevivir. Consecuentemente, se minimizan las pérdidas de nutrientes y la erosión edáfica, y el sistema se hace sostenible. No obstante, muchos de es-

tos sistemas no son sostenibles, ya que una serie de factores sociales, económicos y culturales generan presiones que acortan el período de barbecho, permiten la salida de madera para leña, introducen cultivos no adaptados, ni apropiados, o sobrepastorean animales, promoviendo eventualmente la invasión de especies de arvenses nocivas, o desencadenan el rompimiento del proceso que promueve la recuperación de la cobertura de especies nativas. La sobreutilización del fuego es comúnmente una de las causas de la ruptura de la sostenibilidad.

Sistemas Agrícolas Modernos

En los sistemas agrícolas modernos el fuego juega papeles muy diversos. Los ejemplos citados a continuación representan diferentes niveles de tecnología y tienen diferentes niveles de uso en función del tipo de agroecosistema, la región del mundo y las culturas involucradas. Pueden ser utilizados en cualquier momento durante el ciclo de cultivo, desde la resiembra hasta la cosecha, dependiendo del sistema y del objetivo. El mayor reto en el uso del fuego, antes que cualquier otro, es entender cómo obtener ventaja de los efectos benéficos del fuego, al tiempo que se evitan o minimizan los efectos negativos. Habilidad, experiencia y conocimiento son requisitos igualmente imprescindibles.



FIGURA 10.5
Patrón de cultivo
trashumante en las montañas
de Chiapas, México. Parcelas de barbecho de diversas edades son claramente distinguibles cerca de las parcelas de cultivo. Los agricultores argumentan que se requiere un período de barbecho de 15 a 20 años para que el sistema sea sostenible a largo plazo. Las presiones que acortan este período de barbecho son muchas.

Limpieza del Terreno

En muchas partes del mundo actualmente, el fuego continúa siendo la herramienta más accesible para limpiar la vegetación y biomasa vegetal de la superficie del suelo, antes de la preparación del terreno para la siembra, particularmente en versiones modernas de agricultura trashumante. El uso del fuego para la deforestación es especialmente importante en muchos sistemas forestales, donde la enorme cantidad de leña dejada luego de tumbiar la vegetación es incinerada para facilitar la resiembra, así como para reducir la probabilidad de que los fuegos fuera de control se muevan a través de la leña seca y que detengan el establecimiento de plántulas sembradas por semilla o trasplantadas.

La cantidad de materia seca que necesita cortarse tendrá evidentemente un gran efecto sobre el tipo y la intensidad del fuego. Como se demuestra en el Cuadro 10.1, estas cantidades, llamadas también cargas de leña, varían considerablemente en función del sistema. La leña que se deja sobre el suelo en los sistemas agrícolas trashumantes tropicales puede exceder fácilmente los 4 kg/m², y si se seca y quema en el tiempo adecuado, producirá un fuego caliente y uniforme que consumirá la mayor parte del material vegetal, excepto los troncos y ramas de gran diámetro (Ewel *et al.* 1981). Aún el rebrote secundario tierno producirá 1-2 kg de materia seca/m² y podrá generar

un buen fuego con facilidad (Gliessman 1982).

La corta de sistemas forestales más maduros dejará inevitablemente el bosque lleno de hojarasca, troncos, ramas y puntas, los cuales podrían convertirse en un peligro conforme se secan. Dicha leña también puede proteger a las plagas y ser perjudicial para la recuperación de plántulas de árboles. Por otro lado, conforme la hojarasca se descompone mejora la estructura del suelo y el estado nutricional mientras protege al suelo de la erosión. Todos estos factores necesitan ser considerados al decidir si la leña debería ser quemada uniformemente sobre la superficie, apilada de forma tal que los efectos de la quema pueden ser localizados, o dejarse sin quemar como una cobertura. En algunos sistemas tradicionales, cuando su suministro es limitado (comúnmente menos de 0,5 kg/m²), la leña es apilada, quemada y las cenizas distribuidas uniformemente como fertilizante sobre los campos limpiados.

El ejemplo inigualable del uso del fuego para la limpieza de terreno es un sistema para la renovación de plantaciones viejas de cacao que dejan de ser rentables en Tabasco, México. Primero, se siembra plátano bajo el cacao. Al año siguiente todos los árboles que proporcionan sombra al cacao y los propios árboles de cacao son cortados, dejando una carga pesada de leña de más de 5 kg/m² que cubre los cormos de los plátanos. Una vez que se ha secado adecuadamente, se quema la leña. Inmediatamente después del

CUADRO 10.1 Cargas de roza (leña) disponibles para la quema como parte de la limpieza del terreno en varios ecosistemas

Sistema	Ubicación	Carga de roza (leña) (kg/m ²)	Fuente
Pradera de Napier	Tabasco, México	1,63	Gliessman (1982)
Crecimiento secundario de dos años	Tabasco, México	1,18	Gliessman (1982)
Crecimiento secundario de ocho años	Turrialba, Costa Rica	3,85	Ewel <i>et al.</i> (1981)
Arroz y cebada en partes altas	Centro de Japón	0,34	Koizumi <i>et al.</i> (1992)
Arroz en partes altas	Tabasco, México	0,51	Gliessman (1982)
Arroz en pleno crecimiento	Valle del Centro, California	0,7-0,9	Blank <i>et al.</i> (1993)
Bosque de coníferas	Noroeste Pacífico, EE.UU.	0,5-3,0	Dell y Ward (1971)
Pradera anual	Costa Central, California	0,2-0,3	Gliessman (1992b)

fuego, se siembra un cultivo tradicional intercalado de maíz/frijol/cucurbita, de la misma manera que los sistemas locales de cultivo trashumante, permitiendo una cosecha dentro de los seis meses posteriores al corte inicial. Mientras que los cultivos anuales son sembrados y cultivados, se comienza a proteger a las plantas de plátano y los rebrotes nuevos de los troncos de las leguminosas arbóreas para sombra, además

**FIGURA 10.6**

Montones de roza (leña) quemados en Chiapas, México. Cuando la producción de biomasa es limitada por el clima o el barbecho corto, la roza (leña) puede ser apilada para quemarse y la ceniza es aplicada.

de que les permite desarrollarse. Luego de que los cultivos anuales han completado su ciclo, se plantan cultivos perennes de corta duración como la yuca o la papaya. Antes de que se cosechen éstos últimos, los plátanos habrán formado una copa relativamente continua, al tiempo que se producen plátanos para consumo o venta en el mercado local. Antes del tercer año, los árboles de sombra que rebrotaron también habrán comenzado a convertirse en parte de la copa que da sombra. En este punto, las condiciones de sombra en la superficie del suelo habrían vuelto a los niveles apropiados, reducidos por el proceso de replantación de nuevas plántulas de cacao. Los plátanos son cosechados hasta el momento en que las nuevas plantas de cacao entran en producción (5-7 años después de plantarlos), punto en el cual se completa el ciclo de renovación. Los agricultores locales sostienen que sin el uso del fuego llevaría al menos 10 años para que el cacao pueda comenzar a replantarse en tales áreas, lo que representa un tiempo demasiado largo de espera para este valioso cultivo. Se necesita más investigación que muestre exactamente cómo beneficia el fuego a este agroecosistema.



FIGURA 10.7

*Uso del fuego para renovar plantaciones antiguas de cacao en Tabasco, México. Una combinación de maíz, frijol y cucurbita (arriba) crece entre la ceniza residual de la quema de plantas viejas de cacao (en pie) y los árboles de sombra asociados. Una leguminosa arbórea de sombra (abajo: *Pithecelobium saman*) comienza su recuperación luego del fuego, ésta será podada hasta tener una o dos ramas y eventualmente proporcionará sombra para las plantas nuevas de cacao.*



Adición de Nutrimientos al Suelo

En muchos sistemas de cultivo en el mundo, la ceniza dejada luego de quemar los residuos de cosecha, la leña proveniente de otras plantas y aún la leña como tal, es considerada como una fuente valiosa de nutrimentos que deben ser regresados al suelo. La ceniza es rápidamente incorporada al suelo con la precipitación y los nutrimentos que contiene son fácilmente disponibles como parte de la solución del suelo. La pérdida de nitrógeno y azufre por volatilización durante la combustión, es más que compensada por la entrada en otros nutrimentos y por el incremento en su disponibilidad para las plantas. Se ha demostrado que la ceniza contiene hasta 2.6% de potasio y cantidades significativas de fósforo, calcio, magnesio y otros elementos minerales. Dado que la ceniza puede producirse hasta en 0,4 y 0,67 kg/m², tiene un potencial importante como entrada de nutrimentos a los agroecosistemas (Ewel *et al.* 1981, Seubert *et al.* 1977).

Estos nutrimentos, siendo tan solubles, por supuesto, pueden ser lavados fácilmente del sistema, por lo que una cobertura vegetal eficaz y un buen desarrollo radicular, deben acompañar a la aplicación de nutrimentos a partir de cenizas. El tiempo de aplicación de la ceniza es muy importante. Deben existir raíces activas en el suelo para absorber rápidamente los nutrimentos altamente solubles. También se requiere conocer los patrones de precipitación pluvial para evitar tener aguaceros torrenciales después de la quema o la aplicación de cenizas, de tal for-

ma que evitan que los nutrimentos no sean lixiviados debajo de la zona radicular o lavados de la superficie. Se necesitan realizar investigaciones que definan qué sistemas de cultivo o combinaciones de estos pueden aprovechar mejor los nutrimentos vegetales liberados por el fuego.

Manejo de Residuos de Cosecha

El fuego es frecuentemente utilizado como una herramienta para el manejo de residuos de cosecha. Uno de sus principales beneficios es hacer que el nitrógeno de los residuos sea más fácilmente disponible para el siguiente cultivo. Cuando el residuo es muy rico en carbono, en contraste con el nitrógeno (C/N 25 a 100), el nitrógeno del residuo puede ser inmovilizado por su incorporación en la biomasa microbiana (y luego en forma más permanente en humus del suelo). Sin embargo, la quema convierte al nitrógeno en una forma inmediatamente disponible para su absorción por las plantas. Aun cuando se pierde la mayor parte del nitrógeno por volatilización durante la combustión, la relación C/N de la ceniza es menor en relación con la de los residuos sin quemar, haciendo que el nitrógeno permanezca más rápidamente disponible, al mismo tiempo que se reduce la necesidad de agregar nitrógeno de fuentes externas al sistema.

Otro beneficio de quemar los residuos es la reducción en el número de prácticas de cultivo necesarias. También en muchas partes del mundo en vías de desarrollo los residuos son quemados no para eliminarlos, sino como combustible para cocinar o calentar. En ocasiones la ceniza es recolectada y regresada a los campos de cultivo como complemento para mantener la fertilidad del suelo.

A la producción de arroz se le asocia frecuentemente con el fuego. En cualquier parte del mundo donde se cultiva el arroz, la paja y los tallos secos dejados después de la cosecha pueden constituir desde 0,95 hasta 1,0 kg/m². Tradicionalmente, esta paja ha sido utilizada como alimento para animales, combustible, material de construcción, o como materia prima para hacer compost. Sin embargo, en muchos sistemas actuales de producción de arroz, la necesidad creciente de tener otro cultivo en el campo tan pronto como se cosecha el arroz, ha llevado al uso del fuego para reducir rápidamente la paja a ceniza. La quema reduce las enfermedades y los insectos que

permanecen en los tallos secos, y también disminuye el potencial de producción de metano durante la descomposición bajo condiciones de inundación, en cantidades que podrían ser tóxicas para algunos de los cultivos posteriores. Pero debido a la percepción del impacto del humo sobre la calidad atmosférica, se han empezado a establecer normas que limitan cada vez más la quema y obligan a los agricultores a reincorporar la paja al suelo, o a encontrar usos alternativos para ésta (Blank *et al.* 1993).

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, las ventajas de la quema de residuos deben ser sopesadas contra las desventajas, que incluyen las pérdidas de nutrimentos por la volatilización o lixiviación, contaminación del aire, exposición de la superficie del suelo y la pérdida de entradas de materia orgánica al suelo.

Manejo de Arvenses

El fuego es utilizado más eficaz y de manera práctica para el manejo de arvenses cuando éstas están, ya sea en la hojarasca o en el suelo en forma de semillas, o poco después de su germinación. Las semillas o las plántulas en la hojarasca tienen más probabilidad de ser eliminadas por el fuego, puesto que la hojarasca de la superficie arde a altas temperaturas, las cuales bajan conforme se acerca a la superficie del suelo. Por esta razón, es necesario tener algún tipo de cobertura o residuo de cosecha para avivar el fuego. Los sistemas de roza-tumba-quema son muy eficaces para destruir la semilla en la hojarasca y sobre la superficie inmediata del suelo.

Una práctica desarrollada recientemente para el control de arvenses ha sido usada en Europa por muchos años. Un tanque de propano es conectado a una manguera y a un aspersor, de manera que las llamas pueden ser aplicadas rápidamente sobre la superficie del suelo para destruir las plántulas de arvenses. En el mercado hay disponibles equipos manuales y mecanizados para el control de arvenses mediante el fuego. Algunos aspersores especialmente diseñados y una variedad de deflectores y escudos protegen a las plántulas de los cultivos mientras desecan a las arvenses. Las plántulas de arvenses deben ser muy pequeñas para poder ser controladas eficientemente con esta tecnología, o las plántulas del cultivo deben encontrarse en una etapa de desarrollo que les confiera

... natural de poblaciones de artrópodos como lo son los
... permitiendo la aparición de plagas
... como los escarabajos de la corteza, gu-
... y lepidópteros comedores de ho-
... los gusanos medidores u orugas. Se
... las relaciones de dichos organis-
... de fuegos

... se sabe poco
... en el fue-
... pueden
... ser
... si se destruyen los residuos
... y el fuego es una herramienta en este pro-
... Los perforadores de tallo en cultivos de grano
... en la paja que queda en el campo
... después de la cosecha, y el uso apropiado del fuego
... en su manejo.

... artrópodos que viven en el sue-
... del suelo puede
... este tipo de plagas
... cosecha y el
... del suelo,
... ósito.

... el fuego es probable
... importante en la fluctuación
... alarma a través de algún tipo de
... tipo de tetomina

mayor resistencia al calor, que las arvenses. Bajo ciertas condiciones de campo, cultivos como el maíz, en sus etapas de primera y segunda hoja, tienen una estructura y contenido de humedad que le mantendrá lejos de sufrir daños mientras la mayoría de las plántulas de arvenses son eliminadas. El equipo necesario podría ser caro para comprarlo y utilizarlo y depende mucho del uso de combustibles fósiles, pero en algunos cultivos susceptibles a las arvenses como las zanahorias y las cebollas, el uso de estos equipos lanzallamas es una forma muy rentable de control de arvenses.

Se debe tener cuidado al utilizar el fuego para controlar arvenses. Las arvenses perennes y aquéllas con raíces resistentes al fuego, rizomas, coronas y otras estructuras que resisten el fuego podrían ser estimuladas por el éste. Por ejemplo, un helecho (*Pteridium aquilinum*), es una planta agresiva que puede actuar como arvense en áreas deforestadas o pastizales y es favorecida por el fuego de dos maneras (Gliessman 1978d). Sus profundos rizomas subterráneos le permiten sobrevivir al fuego, y existe evidencia de que la remoción de hojarasca aérea del helecho promueve un rebrote más vigoroso del mismo. Al mismo tiempo, las esporas del helecho son favorecidas por las condiciones del suelo creadas por el fuego y la ceniza, permitiendo un establecimiento del helecho donde no lo había antes y el potencial de su crecimiento vegetativo agresivo a partir de ahí. En sistemas de cultivo trashumantes, donde el fuego es usado para ayudar a limpiar el barbecho, el fuego puede comenzar a tener efectos negativos si el período de barbecho es demasiado corto. Estos efectos incluyen la lixiviación de nutrientes y la invasión de arvenses resistentes al fuego. En general, el uso del fuego para el control de arvenses requiere de la consideración cuidadosa de sus impactos potenciales, basados en las características únicas del sistema.

Manejo de Artrópodos

También el fuego es un medio eficaz para eliminar de los agroecosistemas artrópodos dañinos como insectos y pulgones. El calor, el humo y la pérdida del hábitat se combinan para matar estos organismos (así como sus huevecillos o larvas) o los expelen del sistema. En ecosistemas naturales, el fuego es probablemente un factor tan importante en la fluctuación

natural de poblaciones de artrópodos como lo son los factores climáticos o las interacciones tróficas. La supresión del fuego en los bosques podría alterar el equilibrio natural, permitiendo la aparición de plagas comunes tales como los escarabajos de la corteza, gusanos barrenadores y lepidópteros comedores de hojas, tales como los gusanos medidores u orugas. Se necesita investigar las relaciones de dichos organismos y la frecuencia de fuegos.

No obstante, en los agroecosistemas se sabe poco acerca del manejo de plagas y su relación con el fuego. Se conoce que muchas plagas de insectos pueden pasar el tiempo entre ciclos de cultivo en alguna parte de la planta, viva o muerta, del ciclo anterior. Problemas con el gusano cogollero en el algodón son reducidos drásticamente si se destruyen los residuos vegetales, y el fuego es una herramienta en este proceso. Los perforadores de tallo en cultivos de grano pasan el invierno en la paja que queda en el campo después de la cosecha, y el uso apropiado del fuego podría ayudar en su manejo.

Para las plagas de artrópodos que viven en el suelo, el fuego que penetra la superficie del suelo puede ser un método útil de manejo para este tipo de plagas. La quema de coberturas o residuos de cosecha y el lanzamiento de llamas sobre la superficie del suelo, son maneras de provocar fuego para este propósito.

Una práctica tradicional que utiliza fuego para proteger un cultivo del daño de insectos ha sido reportada en Tabasco, México (Figura 10.8). Un escarabajo coleóptero grande tiene la reputación de ser capaz de invadir cultivos de frijol y defoliarlo en poco tiempo. Los escarabajos atacan en poblaciones grandes y se les puede ver consumiendo las hojas de las plantas en las horas tempranas de la mañana. Los campesinos han señalado que una práctica antigua era entrar en el campo infestado por la mañana, recolectar suficientes escarabajos vivos para ubicar 25-50 de ellos en cada una de varias botellas resistentes al fuego. Al final del día, cada botella era puesta al fuego por tiempo suficiente para matar a los insectos, pero sin quemarlos. Poco después las botellas abiertas eran parcialmente enterradas en el suelo en el campo de frijol, aproximadamente una por cada 400 m². Antes de la mañana siguiente, los campesinos afirman que no habían señales de escarabajos vivos o activos (alimentándose) en el campo. Se sospecha que una alarma a través de algún tipo de feromona podría



alertar a los escarabajos vivos del peligro, de forma tal que abandonaban el campo, pero aún se requiere más investigación al respecto. Desafortunadamente, los campesinos han dejado de usar esta práctica por la introducción de los plaguicidas sintéticos.

Manejo de Patógenos

Debido a la capacidad del fuego de elevar la temperatura en el suelo, particularmente cerca de la superficie, se esperaría que el fuego tenga un impacto significativo sobre los patógenos de las plantas que viven en el suelo, tales como hongos, bacterias y nematodos. En términos generales, se ha hecho poca investigación acerca del efecto del fuego en relación con el manejo de las enfermedades de las plantas, pero algunos estudios (Raison 1979) han demostrado que el fuego provoca cambios biológicos en el suelo, lo que puede reducir efectivamente la inoculación de enfermedades de varios cultivos forestales, frutales, ornamentales, algodón, papa, grano, pastos y forrajes.



FIGURA 10.8

La utilización de escarabajos quemados para repeler otros escarabajos en Tabasco, México. La plaga de escarabajos (Botijón) se alimentan de unas plantas de frijol (izquierda). Los escarabajos son colocados en botellas de vidrio y calentados por tiempo suficiente para matarlos. Las botellas abiertas son luego colocadas en el suelo en torno al cultivo de frijol.



Es interesante notar que la quema de pastizales, una práctica que se ha hecho muy importante en los campos utilizados para producir semilla comercial de pastos en la región noroeste del Pacífico de los EE.UU., se originó con el propósito de controlar enfermedades a finales del decenio de los 40.

El calor y la desecación tienen probablemente los mayores efectos en los organismos patógenos. Las altas temperaturas registradas en la superficie del suelo durante un fuego, y la penetración de calor a varios centímetros de la superficie, pueden eliminar enormes cantidades de organismos patógenos y su inóculo. Además, el aumento repentino del pH causado por el humedecimiento de la ceniza depositada sobre el suelo, luego de un fuego, puede tener un efecto inhibitorio sobre los hongos, ya que éstos prefieren condiciones de neutras a ácidas para su óptimo desarrollo. Por otro lado, muchas bacterias son de hecho estimuladas por el pH más alto, y podrían convertirse en un problema si es que son patógenas.

El efecto de quemar material vegetal aéreo sobre los patógenos potenciales de las plantas, particularmente los residuos de cosecha, está bien documentado. En virtud de que un fuego bien manejado puede consumir hasta 95% de la biomasa aérea y generar calor extremo, puede matar a la mayoría de los patógenos presentes en la biomasa. Este efecto del fuego es la razón más común por la que se queman los residuos de cosecha, como se describió anteriormente.



FIGURA 10.9
Especies de chaparral invadiendo pastizales, Santa Bárbara, CA. Se requiere fuego para suprimir periódicamente los arbustos y promover el crecimiento del pasto para pastoreo.

Preparación de un Cultivo para la Cosecha

El fuego también puede ser utilizado para preparar un cultivo para la cosecha. Un ejemplo común es la quema de las plantaciones de caña de azúcar unos días antes de la cosecha. Los cortadores de caña argumentan que el fuego es importante para quitar las hojas secas de los tallos, lo que facilita el proceso de cortado cuando se hace manualmente, haciendo el acceso a las cañas más fácil, y ahuyentando animales molestos como ratas y serpientes. Pero la facilidad de cosecha en tal sistema debe ser sopesada con los impactos ecológicos tales como la pérdida de materia orgánica, la volatilización de ciertos nutrimentos y la lixiviación de estos con las lluvias torrenciales. En el caso de la caña de azúcar en particular, otro posible efecto negativo del fuego podría ser la degradación de la calidad del azúcar extraído a partir del sobrecalentamiento de la caña.

Otra función sencilla del fuego al momento de la cosecha es en la recolección de nueces comestibles. Los frutos (conos) de algunas especies de pino piñón son recolectados de los árboles antes de que se abran y sus semillas (llamadas nueces) se dispersen. Generalmente, los conos son cubiertos por una goma densa. El fuego es usado para calentar rocas sobre las que luego son colocados los conos, derritiendo la goma y abriendo los conos para liberar la semilla. También puede usarse para calentar un horno dentro del cual pueden colocarse los conos cubiertos de goma.

leñosas invadan; por ello se utiliza el fuego para eliminar la acumulación de crecimiento de especies grasas no comestibles. En regiones de sabana donde la sucesión natural favorecería la invasión de especies leñosas, la quema tiene mayor valor.

disponible:

- destruir parásitos tales como garrapatas y pulgas que puedan transmitir enfermedades a los animales
- controlar la dispersión de plantas indeseables en las praderas o pastizales;
- evitar riesgos de fuego no controlado por acumulación de pasto o forraje viejo;
- establecer "cortinas" de fuego (guardarrayas) como sistema de protección contra fuegos no controlados;
- preparar la cama de semilla para la siembra natural o artificial de especies vegetales deseables;
- estimular a algunas plantas para la producción de semilla;
- estimular el crecimiento de leguminosas nativas para la producción de forraje y mejoramiento de la fertilidad del suelo; y
- promover mayor rapidez en el reciclaje y absorción de nutrimentos.

Todos estos efectos potenciales del fuego pueden jugar papeles importantes en la determinación del régimen más apropiado de manejo del uso del fuego.

La importancia relativa de cada uno de los efectos de la quema varía con el tipo y la intensidad del sistema de pastoreo, el tiempo transcurrido después del último fuego, la época del año y la etapa de desarrollo de las plantas comestibles. Por ejemplo, en pastizales abiertos, existe poca tendencia de que las especies

se incorpore en el manejo de los pastizales. En otras áreas, donde los pastizales rodean a la vegetación arbustiva o arbórea, la ausencia de fuegos periódicos hace que las especies leñosas más agresivas invadan gradualmente los pastizales. Las pasturas anuales en las lomas de las montañas costeras del centro y sur de California, son invadidos por chaparrales arbustivos alelopáticos cuando se restringe el fuego por algunos años (Muller 1974).

Investigaciones Futuras

Probablemente una de las herramientas más antiguas usadas en la agricultura, el fuego, tiene aún considerable valor en la búsqueda de prácticas agrícolas sostenibles. Pero la capacidad de utilizar el fuego para beneficiar el sistema depende del conocimiento suficiente de los impactos a largo plazo, que el fuego tendrá en los diferentes componentes de la estructura y función del agroecosistema. Se necesita investigación que deseche la idea del fuego como un factor de destrucción en el ambiente y nos ayude a hacer uso de su capacidad para liberar nutrimentos de la materia orgánica, alterar rápidamente la estructura del agroecosistema, eliminar organismos indeseables y emular a los sistemas naturales.

Manejo de Praderas y Agostaderos

A pesar de que en la mayoría de las áreas de pastizales del mundo el fuego natural es frecuente y un aspecto importante del ambiente, el uso eficaz de éste como una herramienta de manejo de los sistemas de pastoreo no es en realidad tan común. Cuando el fuego se usa en sistemas de pastoreo, se hace en forma de fuego controlado conocido como **quemado intencional**. Una quemada intencional en un agroecosistema de pastoreo puede cumplir diferentes objetivos. El fuego puede:

- quemar el material vegetal no palatable de estaciones previas que no es consumido por la mayoría de los animales y que de otra manera competiría con las especies preferidas;
- estimular el crecimiento (como rebrote en respuesta al fuego en plantas perennes) en épocas del año en que normalmente habría muy poco forraje disponible;
- destruir parásitos tales como garrapatas y pulgas que pueden transmitir enfermedades a los animales;
- controlar la dispersión de plantas indeseables en las praderas o pastizales;
- evitar riesgos de fuego no controlado por acumulación de pasto o forraje viejo;
- establecer "cortinas" de fuego (guardarrayas) como sistema de protección contra fuegos no controlados;
- preparar la cama de semilla para la siembra natural o artificial de especies vegetales deseables;
- estimular a algunas plantas para la producción de semilla;
- estimular el crecimiento de leguminosas nativas para la producción de forraje y mejoramiento de la fertilidad del suelo; y
- promover mayor rapidez en el reciclaje y absorción de nutrientes.

Todos estos efectos potenciales del fuego pueden jugar papeles importantes en la determinación del régimen más apropiado de manejo del uso del fuego.

La importancia relativa de cada uno de los efectos de la quemada varía con el tipo y la intensidad del sistema de pastoreo, el tiempo transcurrido después del último fuego, la época del año y la etapa de desarrollo de las plantas comestibles. Por ejemplo, en pastizales abiertos, existe poca tendencia de que las especies

leñosas invadan; por ello se utiliza el fuego para eliminar la acumulación de crecimiento de especies vegetales no comestibles. En regiones de sabana, o áreas donde la sucesión natural favorecería la vegetación arbustiva o arbórea, la quemada tiene mayor importancia para suprimir algunas especies de plantas mientras se establecen o mantienen los componentes de la pradera.

Cuando el fuego es evitado en áreas de pastoreo que normalmente se queman con cierta regularidad, los pastos pierden su dominancia y pueden ser reemplazados por especies arbustivas poco o no comestibles. Por ejemplo, los pastizales en la Gran Cuenca del oeste de los EE.UU. se convierten en áreas arbustivas de *Artemisia* (*Artemisia tridentata*) con la ausencia del fuego, especialmente cuando se combinan con una presión de pastoreo excesiva. Las áreas de sabana abiertas de las regiones del suroeste de los EE.UU. o del norte de México, donde los pastos crecen entre mezquite y juniper, se convierten en virtuales bosques de especies arbóreas cuando el fuego no se incorpora en el manejo de los pastizales. En otras áreas, donde los pastizales rodean a la vegetación arbustiva o arbórea, la ausencia de fuegos periódicos hace que las especies leñosas más agresivas invadan gradualmente los pastizales. Las pasturas anuales en las lomas de las montañas costeras del centro y sur de California, son invadidos por chaparrales arbustivos alelopáticos cuando se restringe el fuego por algunos años (Muller 1974).

Investigaciones Futuras

Probablemente una de las herramientas más antiguas usadas en la agricultura, el fuego, tiene aún considerable valor en la búsqueda de prácticas agrícolas sostenibles. Pero la capacidad de utilizar el fuego para beneficiar el sistema depende del conocimiento suficiente de los impactos a largo plazo, que el fuego tendrá en los diferentes componentes de la estructura y función del agroecosistema. Se necesita investigación que deseché la idea del fuego como un factor de destrucción en el ambiente y nos ayude a hacer uso de su capacidad para liberar nutrientes de la materia orgánica, alterar rápidamente la estructura del agroecosistema, eliminar organismos indeseables y emular a los sistemas naturales.

Ideas para Meditar

1. ¿Qué tipo de conocimientos e información son necesarios para convencer a los agricultores del uso del fuego como una herramienta que contribuya a lograr la sostenibilidad?
2. ¿Cuáles son algunas de las formas en que los diferentes tipos de fuego que ocurren en los ecosistemas naturales podrían combinarse para encontrar vías útiles para aplicarlos al manejo de agroecosistemas?
3. El humo de la atmósfera es frecuentemente considerado completamente indeseable, con recientes restricciones que se imponen a actividades que producen humo diariamente. ¿Cómo justificaríamos el uso del fuego en la agricultura, aún cuando el humo pudiera ser uno de los subproductos?
4. ¿Cuál considera que tiene mayor significancia agroecológica en el manejo: los efectos abióticos del fuego, o sus efectos bióticos? Explique ¿por qué?
5. ¿En cuáles condiciones sería posible utilizar eficazmente el fuego en sistemas diversos, de mezcla de cultivos y especies perennes?

Lecturas Recomendadas

Bond, W.J. and B. Van Wilgen. 1995. *Fire and Plants*. Chapman & Hall: New York.

Un texto inigualable sobre las muchas y variadas respuestas y adaptaciones de las plantas al factor fuego.

Hecht, S. and A. Cockburn. 1990. *The Fate of the Forest: Developers, Destroyers, and Defenders of the Amazon*. Harper Perennial: New York.

Un análisis embelesador del complicado drama humano en la cuenca del Amazonas, donde el fuego ha jugado un papel importante en el desarrollo de la agricultura.

Spencer, J.E. 1966. *Shifting Cultivation in Southeast Asia*. Univ. California Press: Berkeley.

Una de las autoridades más destacadas en el sistema agrícola que utiliza fuego y que ha prevalecido por cientos de años.

Watters, R.F. 1971. *Shifting Cultivation in Latin America*. FAO: Rome.

Una revisión exhaustiva de cómo el fuego es empleado en la agricultura trashumante en toda América Latina.

West, O. 1965. *Fire in Vegetation and Its Use in Pasture Management*. Publication 1/1965. Commonwealth Agricultural Bureau. Hurley: Berkshire.

Una excelente revisión de la ecología y el manejo del fuego en ecosistemas de pastoreo.

Whelan, R.J. 1995. *The Ecology of Fire*. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press: New York.

Un análisis del fuego como un factor ecológico en el ambiente.

FACTORES BIÓTICOS

Los capítulos desde el 4 hasta el 10 están enfocados en conocer cómo las plantas son afectadas por los factores ambientales abióticos, tales como la luz, la temperatura y los nutrientes minerales. En este capítulo, completaremos la figura, explorando la forma en que los factores bióticos del ambiente, es decir, las condiciones creadas y modificadas por los organismos vivos, afectan las plantas.

En los agroecosistemas, el agricultor es, de hecho, el organismo que causa mayor impacto en el ambiente en el que los cultivos crecen y se desarrollan. El agricultor altera y ajusta las condiciones físico-bióticas para satisfacer las necesidades de los cultivos. Para hacerlo sostenible, el agricultor debe tener un entendimiento de las interacciones bióticas de los agroecosistemas, es decir, de la forma en que cada miembro de la comunidad tiene impacto en el ambiente agrícola y altera las condiciones para sus vecinos.

Para entender los factores bióticos en términos ecológicos, debemos entrar a un área de traslape entre la autoecología y la sinecología. Aún cuando empezamos desde la perspectiva del organismo individual, confrontado con un ambiente caracterizado por distintos factores, debemos también considerar las interacciones entre organismos, cuando esos factores son bióticos. No obstante, su origen sinecológico, los conceptos desarrollados en este capítulo para describir estas interacciones pueden ser aplicados en un enfoque autoecológico, considerando dichas interacciones en términos de su impacto sobre cada organismo en el agroecosistema.

Hay dos marcos básicos para comprender las interacciones entre organismos en una comunidad o ecosistema; cada uno tiene sus respectivas ventajas. En la ecología, las interacciones han sido entendidas tradicionalmente en términos de los efectos que dos organismos que interactúan tienen uno sobre el otro. Este esquema es la base para dos conceptos fundamenta-

les como son la competencia y el mutualismo. No obstante, en la agroecología, por lo general, es más útil visualizar las interacciones como algo derivado del impacto que los organismos tienen en su ambiente. Los organismos remueven sustancias, las alteran, o añaden otras en las áreas que ocupan, cambiando así las condiciones ambientales tanto para ellos mismos como para los otros organismos. Así, cada factor biótico que un organismo individual enfrenta puede entenderse como una modificación del ambiente creada por otro organismo. Ambas perspectivas son explicadas con más detalle a continuación.

LA PERSPECTIVA ORGANISMO-ORGANISMO

Un sistema de clasificación de las interacciones ampliamente aceptado fue aquel desarrollado por E. P. Odum (1971). Este sistema tiene muchas aplicaciones útiles y ha permitido a los ecólogos entender el ambiente biótico. Las interacciones entre dos organismos de diferentes especies pueden tener efecto negativo (-) o positivo (+), o un efecto neutro (0) para cada participante en la interacción. Por ejemplo, en la interacción clasificada como mutualismo, ambos organismos sufren un impacto positivo (++)). El grado en el cual la interacción es positiva o negativa para cada organismo depende del nivel de interdependencia y del nivel de intensidad de la interacción.

En este esquema, hay una distinción importante entre situaciones en las que ambos miembros están presentes y hay interacción, y situaciones en las cuales los dos entes están separados, o juntos pero no hay interacción. En el Cuadro 11.1, la columna de "no interacción" muestra los resultados de esta última situación y proporciona un indicativo sobre el grado de dependencia o de "necesidad", para la interacción que cada miembro puede haber desarrollado durante el tiempo evolutivo.

CUADRO 11.1 Tipos de interacciones entre dos especies como fue descrito por Odum

Interacción	Con interacción		Sin interacción		Comentarios
	A	B	A	B	
Neutralismo	0	0	0	0	Los organismos no se afectan entre sí
Competencia	-	-	0	0	A y B son afectados negativamente
Mutualismo	+	+	-	-	Interacción obligada
Protocooperación	+	+	0	0	Interacción no obligada
Comensalismo	+	0	-	0	A es comensal obligado y B es hospedante
Amensalismo	-	0	0	0	A es perjudicado por la presencia de B
Parasitismo	+	-	-	0	A es parásito y B es hospedante
Depredación	+	-	-	0	A es depredador y B es la presa

+El crecimiento del organismo se incrementa

- El crecimiento del organismo disminuye

0 El crecimiento del organismo no se ve afectado

La interacción a la cual probablemente se le ha dado mayor atención, especialmente en el diseño de agroecosistemas convencionales, es la **competencia** (- -). La competencia se presenta en un ambiente donde los recursos son limitados para ambos miembros de la relación, y aún cuando uno de ellos puede terminar dominando al otro, al final, ambos resultan afectados durante la interacción. Los organismos tienen interacción entre sí, dado que cada uno remueve del ambiente algo que ambos necesitan. En este sentido, hay una alta probabilidad de que dos variedades cultivadas de una misma especie compitan en un ambiente de recursos limitados, como sería el caso de un campo de cultivo con bajos niveles de nitrógeno en el suelo.

Cuando dos organismos han generado interdependencia, de manera tal que se ven afectados negativamente cuando no están en interacción, se dice que hay **mutualismo** (+ +). Ambos organismos dependen de la forma en que el otro modifica el ambiente para los dos. Por ejemplo, algunas interacciones entre leguminosas y bacterias del género *Rhizobium* son de tipo mutualista: ambos organismos prosperan mejor juntos que cuando están solos.

Cuando una interacción beneficia a ambos miembros, pero ninguno es afectado negativamente en la ausencia de la interacción, se habla entonces de **protocooperación** (+ +). La polinización es un buen ejemplo de una interacción de este tipo: cuando hay varias especies de insectos polinizadores disponibles y muchas especies productoras de néctar, una especie de polinizador y una especie de planta se benefician de igual forma si interactúan, pero ninguno es perjudicado si no

se da la interacción. Tanto el mutualismo como la protocooperación son tipos de **simbiosis**, un término derivado del griego que significa "vivir juntos."

Cuando un organismo mantiene o proporciona las condiciones necesarias para el desarrollo de otro, pero sin afectar su propio bienestar, la interacción (+ 0) se denomina **comensalismo**. El organismo que requiere de las condiciones que el otro crea, sufre cuando este último no está presente. Por ejemplo, las especies arbóreas de sombra, presentes en el sistema agroforestal de cacao, reducen la intensidad de la luz que llega a los estratos inferiores, lo que favorece al cacao, que es una planta umbrófila; el árbol de sombra se desarrolla de la misma forma, esté o presente el cacao.

Cuando una especie afecta negativamente a otra, pero su propio desarrollo no se ve disminuido, entonces la interacción se denomina **amensalismo** (- 0). Un ejemplo de una interacción de este tipo se presenta cuando una planta libera una sustancia química por sus hojas durante una llovizna o aguacero, la que puede tener un impacto negativo sobre otras plantas vecinas, pero que no afecta a la planta liberadora de dicha sustancia. Tal proceso es una forma de alelopatía, la que será discutida con mayor detalle en los siguientes párrafos. Un ejemplo de este tipo de amensalismo es la relación entre el nogal negro (*Juglans nigra*) y cualquier planta que intente crecer bajo su copa. Las sustancias químicas lavadas de las ramas y hojas del nogal negro, así como los exudados de sus raíces son productos tóxicos para la mayoría de las plantas.

En los dos tipos de interacción restantes, uno de los organismos sufre un impacto negativo por las acciones del otro (+ -). Por lo general, el organismo que

actúa sobre el otro tiene una relación obligada con este, mientras que el organismo que sufre las consecuencias de la interacción se desarrolla mejor sin la interferencia de aquél; en esta última situación la relación se torna (-0). En el **parasitismo**, un organismo (el parásito) se alimenta del otro (el hospedante), pero éste raramente muere. El parásito puede vivir en el hospedante durante un largo periodo y este último puede sobrevivir, pero su capacidad se ve disminuida. Algunos parásitos, conocidos como parasitoides, causan la muerte del hospedante (por ejemplo, las avispa del género *Trichogramma*); nosotros tomamos ventaja de tales interacciones para el control biológico en los agroecosistemas.

La **depredación** es una interacción mucho más directa, donde un organismo mata y consume a su presa. Dependemos en gran medida de la depredación realizada por ciertos organismos benéficos para el manejo de plagas en los sistemas agrícolas.

El esquema de clasificación que se ha desglosado es muy útil para distinguir los tipos de interacciones que son observadas en la mayoría de los ambientes naturales. Sin embargo, se enfoca hacia el resultado final de cada tipo de interacción, más que en los mecanismos involucrados cuando ésta ocurre.

LA PERSPECTIVA ORGANISMO-AMBIENTE-ORGANISMO

Cada una de las interacciones descritas anteriormente pueden ser entendidas de manera alternativa, si es vista como la modificación del ambiente causada por un organismo que tiene un efecto en otro organismo en la interacción. Según el enfoque de como el ambiente interviene en el efecto que un organismo tiene sobre el otro, es posible entender el **mecanismo** mediante el cual se producen los efectos. Conociendo este mecanismo, quien maneje el agroecosistema estará en una mejor capacidad para manipular o tomar ventaja de las interacciones.

Cuando un organismo modifica de alguna forma el ambiente de manera tal que afecta a otro organismo, esa modificación es denominada como **interferencia**. Las interferencias pueden ser divididas en dos tipos:

- **interferencia por remoción:** un organismo remueve algo del ambiente, reduciendo la disponibilidad de ese recurso para el otro organismo;

- **interferencia por adición:** un organismo añade algo al ambiente, lo cual puede afectar positiva o negativamente al otro organismo, o bien no tener un impacto sobre el mismo (neutro).

Comúnmente, sólo una de estas interferencias se presenta en una interacción particular, pero pueden presentarse juntas en algunas interacciones, como se discutirá más adelante. Bajo este esquema, la interacción entre dos o más organismos se entiende como el impacto sobre el ambiente (adición o remoción) causado por un organismo (y en algunos casos un impacto adicional creado por el otro organismo), seguido por la respuesta de ambos organismos a los cambios resultantes en el ambiente. Los tipos de interferencia por remoción o adición son descritos con mayor detalle más adelante y resumidos en el Cuadro 11.2

Interferencias por Remoción

Cuando un organismo remueve algo del ambiente, como parte de sus actividades vitales o de su interacción con un organismo, puede afectar a otros. Este tipo de interferencia es generalmente negativa para uno o más miembros de la interacción, pero también puede tener efectos positivos. Hay varios tipos de interferencia por remoción en los agroecosistemas.

Competencia

Solamente es necesario mayor énfasis para entender la competencia como una interferencia por remoción. La competencia se presenta cuando dos organismos remueven un recurso del ambiente (luz, nitrógeno, agua, etc.) el cual no es suficientemente abundante para satisfacer las necesidades de ambos. Varios de los capítulos anteriores han descrito las condiciones bajo las cuales los recursos se tornan limitantes, determinando así el estado de la competencia.

Si se visualiza la competencia como una interferencia por remoción se logra tener una vía alterna para entender lo que comúnmente se denomina como competencia por espacio. Bajo este esquema, el espacio es visto como una mezcla compleja de recursos que es afectada por la remoción de los mismos, causada por los organismos que habitan ese espacio; así, los organismos están en competencia por los recursos que hay en él, no por el espacio mismo.

La competencia entre individuos de la misma especie -**competencia intraespecífica**- puede ser muy intensa, dado que las necesidades de los individuos que interactúan son muy similares. La agricultura de monocultivo ha invertido mucha energía en determinar la densidad óptima en que los cultivos pueden sembrarse, sin que se presente competencia entre las plantas individuales, lo que afectaría negativamente la producción.

La competencia entre individuos de diferentes especies, denominada **competencia interespecífica**, puede también ser importante cuando los niveles de los recursos no son suficientes para satisfacer las necesidades de ambos. El mecanismo de la interacción involucra la remoción de un recurso o su protección directa o "secuestro" por un organismo (por ejemplo, cuando un animal defiende un territorio y sus recursos). En cualquier caso, el recurso es el foco primario de la interacción.

La competencia es un concepto muy importante en la ecología, pero también tiene una historia de controversia y discusión. Por un lado, la competencia interespecífica es una piedra angular de la ecología evolutiva. La competencia es considerada el ingenio de la selección natural y una fuerza con la cual todos los organismos deben convivir en su esfuerzo por sobrevivir y dejar descendencia. Sin embargo, de manera interesante los ecólogos también comprenden que evitar la competencia puede, en su momento, tener ventajas para una especie, y que esto probablemente ha jugado un papel clave en el desarrollo de la diversidad de las especies.

Identificando el proceso de remoción que conduce a la competencia, pero sin estudiar los mecanismos de la interferencia que están involucrados en la misma, podemos solamente asumir que la competencia ocurre. El manejo de los agroecosistemas requiere una determinación más detallada de las interacciones competitivas, de otra forma el agricultor se queda con la única

opción de saturar el sistema con un exceso de insumos externos.

Parasitismo

Como fue descrito anteriormente, el parasitismo es una interacción en la cual dos organismos viven juntos, con uno (el parásito) obteniendo su alimento de los tejidos del otro (el hospedante), sin llegar a matarlo. En términos de interferencia, el ambiente en el cual ocurre la remoción es el cuerpo del hospedante. Los parásitos son fisiológicamente dependientes de sus hospedantes, tienen vidas mucho más cortas que ellos, pero tienen un alto potencial reproductivo.

La relación entre el matapalo y varias especies de árboles es un ejemplo de este tipo de interferencia por remoción. Esta planta penetra y se desarrolla dentro del sistema vascular del árbol hospedante, consumiendo el agua y sus nutrimentos. Si el parásito se torna muy abundante, el árbol se dobla y, por lo general, se deforma y puede entonces volverse más susceptible al ataque de otras plagas. Los animales de granja y de praderas son especialmente susceptibles a los parásitos; éstos incluyen garrapatas que atacan ca-



FIGURA 11.1

El muérdago parásito sobre un árbol de guayaba, Monteverde, Costa Rica. La rama de guayaba está tan infestada por el parásito, que solamente se ven las flores rojo-anaranjadas del muérdago.

ternamente al hospedero, y gusanos barrenadores que se desarrollan de los huevecillos puestos por moscas; también son parásitos de los animales de granja aquéllos que se desarrollan en su estómago, tales como bacterias y gusanos.

Bajo condiciones naturales, el parasitismo representa probablemente un tipo de compromiso entre el hospedante y el parásito. Ambos han evolucionado juntos en el tiempo, siendo el hospedante tolerante a la infección de bajo nivel, y el parásito dependiendo de la continuidad de la vida de su hospedante, para su propio éxito reproductivo. Sin embargo, en situaciones agrícolas, especialmente en las condiciones de monocultivo, los parásitos pueden convertirse en una forma severa de enfermedad que pone a todo el cultivo en riesgo de desarrollar enfermedades secundarias, incluso hasta la muerte.

Herbivorismo

La relación de interferencia entre un herbívoro y la planta que consume es muy directa (al igual que sucede en la interacción entre un parásito y su hospedante), siendo el tejido de la planta la parte del ambiente que es removida. Sin embargo, más allá del enfoque de la planta individual, el herbivorismo es una interferencia por remoción en un sentido más amplio, en el que la biomasa y los nutrimentos contenidos en ella son removidos del ambiente. El consumo del material vegetal reduce el retorno de la biomasa al suelo, y si la remoción es muy intensa y además ocurre durante largo tiempo, puede conducir al agotamiento de los nutrimentos en el sistema.

Desde una perspectiva agrícola, el herbivorismo puede tener tres tipos de impactos negativos. En primer lugar, remueve área fotosintética que puede ser importante para el desarrollo del cultivo. En segundo lugar, reduce el retorno al suelo, como residuo, de la parte consumida del cultivo, afectando así su ingreso al sistema. Por último, si el herbivorismo daña la parte del cultivo que iba a cosecharse y enviarse al mercado, el valor de venta del producto puede sufrir un decremento.

Sin embargo, los efectos del herbivorismo no son siempre negativos. Por ejemplo, en algunas situaciones de pastizales, el consumo de material vegetal puede ser benéfico para la productividad de la especie forrajera. La remoción del exceso de material ve-

getal puede estimular la producción de nueva biomasa o, más aún, permitir la germinación de ciertas especies de plantas que son suprimidas por la presencia constante de cobertura o por el exceso de la misma, haciéndose entonces más predominantes en la comunidad de pastos. El papel evolutivo de esta interferencia por remoción ha sido bien documentado en las Llanuras de Serengeti, en África (McNaughton 1985), donde se ha demostrado que la mayor productividad y diversidad de especies, tanto de plantas como de animales, se ha desarrollado bajo patrones cíclicos de pastoreo multiespecífico. Los buenos ganaderos saben que el pastoreo rotacional promueve la mayor producción en los sistemas de pastizal.

En los sistemas naturales, el herbivorismo también juega un importante papel en la remoción de biomasa excedente, dirigiendo el flujo de energía y reciclando los nutrimentos. Estos procesos tienen el potencial para jugar papeles importantes y positivos en los agroecosistemas, pero los humanos han tendido a ver el herbivorismo como algo completamente negativo, por lo tanto, superar esta actitud representa un gran reto. La investigación futura necesita ser enfocada hacia la manera en que la presión de interferencia por remoción puede ser dirigida más allá de los componentes de los agroecosistemas valorados económicamente, y concentrarse en partes que estimulen a otros componentes del sistema en vías de contribuir a la sostenibilidad.

Interferencias por Adición

Muchos organismos con sus procesos vitales diarios añaden algo al ambiente que impacta a los organismos asociados. Estos impactos pueden ser negativos, como cuando la adición causa una reducción en el crecimiento o desarrollo de los organismos asociados, o cuando los excluye del área por completo. En otros casos, el impacto de la interferencia por adición puede ser positivo para los organismos asociados, como cuando éstos usan la sustancia o material añadidos para mejorar su propio establecimiento en la comunidad, o cuando la exclusión de organismos intolerantes del hábitat les permite a los organismos acompañantes ocuparlo. A final, los organismos asociados que se benefician de la adición pueden desarrollar una dependencia del organismo que realiza tal

adición, creando una relación de coexistencia o, mejor aún, de simbiosis.

Epifitismo

Cuando un organismo vive en el cuerpo de otro sin extraer de él algún nutrimento, se dice que se trata de una interferencia por adición, debido a que el hospedante está añadiendo una estructura física al ambiente, la que sirve a otro organismo como hábitat. Cuando los dos organismos de la interacción son plantas y el hábitat es un tronco o tallo, la planta beneficiada se denomina **epífita**; cuando el hábitat es una hoja, la denominación es **epífila**. En los términos de Odum, el epifitismo es una forma de comensalismo.

Las epifitas y las epífilas no obtienen agua o alimento de la planta de apoyo, ni tienen conexiones con el suelo. El agua la obtienen de la lluvia, y los nutrimentos de las partículas que transporta el viento, de la muerte de partes de la planta de soporte y de minerales y compuestos orgánicos disueltos en las gotas de lluvia. La mayoría de las plantas epifitas enfrentan frecuentes condiciones de sequía en su ambiente aéreo, aún en los hábitats húmedos donde son más comunes. Las algas, los líquenes, los musgos y unos pocos helechos son las más comunes epifitas en ambientes fríos y húmedos; una amplia variedad de plantas vasculares ha evolucionado el estilo de vida epifítico en climas cálido-húmedos, especialmente helechos y especies de las familias Bromeliaceae y Orchidaceae. Muchas especies en estas dos familias tienen importancia económica considerable en horticultura y floricultura, y son colocadas en soportes artificiales en invernaderos y casas de venta comercial de plantas.

Una planta epífita de considerable importancia económica en agricultura en varios países tropicales es la vainilla (*Vanilla fragrans*). Esta planta produce largas raíces adventicias aéreas en cada

hoja, que se adhieren firmemente al tronco o rama de la planta hospedante. Algunas veces las raíces se doblan hacia el suelo, pero sólo se ramifican en el humus o en la capa de cobertura. Los frutos capsulares de más de 25 cm de largo (llamados vainas en el mercado) se forman en los tallos aéreos, y para su formación exitosa dependen de la polinización manual, en muchas partes del mundo en las que el cultivo ha sido introducido desde su nativa Mesoamérica.

Simbiosis

Cuando dos organismos adicionan algo al ambiente que los beneficia mutuamente, forman una relación simbiótica. Si la relación no es obligatoria y no es esencial para la sobrevivencia de cualquiera de ellos, la relación resultante es llamada **protocooperación**. Un ejemplo de este tipo de interacción es la relación entre la abeja europea (*Apis mellifera*) y las plantas que poliniza. La planta que la abeja visita adiciona polen y néctar al ambiente, lo que atrae al polinizador. La recolección de néctar o miel por la abeja es una interferencia por remoción, pero el polen es añadido al ambiente cuando la abeja lo deposita en el es-



FIGURA 11.2

*Una plantación de la vainilla, orquídea epífita, en Tabasco, México. Las plantas de vainilla (*Vanilla fragrans*) crecen a la sombra de los árboles de *Gliricidia sepium*.*

tigma de otra flor—este es el punto en el cual los efectos positivos de la interacción se logran. Las abejas visitan un amplio rango de especies vegetales, la mayoría de las cuales son también visitadas por otros polinizadores, haciendo la relación entre la abeja y cualquier tipo de planta no obligatoria. Sin embargo, en muchas áreas agrícolas, la dramática reducción de la diversidad biótica que ha acompañado a la expansión de los monocultivos, el uso indiscriminado de plaguicidas y el aislamiento de los terrenos de los productores por cercas, han creado una dependencia artificial de las abejas, las que son protegidas y transportadas en apiarios a los campos de cultivo durante el tiempo de la polinización.

Cuando los organismos que se benefician uno de otro mediante la interferencia por adición establecen una relación de dependencia para su desempeño óptimo, e incluso para su supervivencia, entonces la relación es un mutualismo. Un buen ejemplo de este tipo de interacción es la relación entre ciertos hongos del suelo y las plantas vasculares asociadas. Los hongos tienen **micorrizas** que son estructuras especiales que pueden formar conexiones con las raíces de las plantas. La micorriza permite a la raíz proporcionar azúcares al hongo, y este, en compensación proporciona agua y nutrimentos a la planta. Hay dos tipos de micorrizas: a) *ectotrófica*, en la cual el micelio del hongo forma un denso manto que cubre la superficie de la raíz, con muchas hifas que se extienden en el suelo, y otras que lo hacen hacia dentro, penetrando entre las células de la epidermis y la corteza de la raíz (muy común en la familia Pinaceae); y b) *endotrófica*, el tipo más común, en donde no existe el manto superficial formado por el micelio, sino más bien algunas de las hifas colonizan los protoplastos de los tejidos parenquimatosos y se extienden hacia afuera introduciéndose en el suelo (común en la mayoría de las familias de plantas con flores, y especialmente importante en especies cultivadas como: maíz, frijoles, manzanas y frambuesas).

Otro ejemplo importante de mutualismo es la relación entre las leguminosas (plantas de la familia Fabaceae) y las bacterias del género *Rhizobium*. Las bacterias entran al tejido radical de una leguminosa, provocando que ésta forme nódulos en los cuales las bacterias viven y se reproducen. Los nódulos, formados de tejido radical, representan una interferencia por adición sobre la propia bacteria leguminosa. Esta última también provee azúcares. La interferencia por adición en el caso de la bacteria se presenta en la forma de nitrógeno fijado (que puede ser usado) por ella a partir del nitrógeno atmosférico. La leguminosa podría ver seriamente comprometido su crecimiento sin el nitrógeno fijado proporcionado por la bacteria, y ésta requiere los nódulos de la raíz para su crecimiento y reproducción óptima. La fijación de nitrógeno por *Rhizobium* es una de las formas más importantes por las cuales el nitrógeno es movido del amplio reservorio atmosférico hacia el suelo y la biomasa.

Como se verá en los últimos capítulos, el mutualismo benéfico, donde dos o más miembros de la relación interactúan por medio de una interferencia por adición, es el más importante en el diseño y manejo de muchos agroecosistemas con cultivos intercalados.



FIGURA 11.3

Nódulos en las raíces de plantas de haba. Los nódulos son habitados por bacterias fijadoras de nitrógeno del género Rhizobium, en asociación mutualista con la leguminosa.

Alelopatía

Una forma de interferencia que recientemente ha recibido considerable atención, especialmente en la agricultura, es la **alelopatía** (Gliessman 1989). La alelopatía es la producción de un compuesto por una planta que, cuando es liberado al ambiente, tiene un impacto estimulante o inhibitorio sobre otros organismos. Se ha demostrado que las interacciones alelopáticas ocurren en gran variedad de ecosistemas naturales y agroecosistemas.

Los compuestos alelopáticos son productos naturales que pueden ser metabolitos directos, subproductos de otros pasos metabólicos o productos de la descomposición de otros compuestos o de la biomasa. Los compuestos son por lo común tóxicos para la planta que los produce si no son almacenados en una forma no tóxica o liberados antes de que se acumulen en niveles que resultan tóxicos a lo interno de la planta. En algunos casos, aún cuando las toxinas son liberadas de la planta, pueden acumularse en el ambiente inmediato y resultar tóxicas para la planta que los produjo. Los productos alelopáticos tienen muchas formas, desde solubles en agua hasta volátiles, de simples a complejos, de vida corta hasta persistentes. Los compuestos alelopáticos más comunes pertenecen a los grupos químicos: taninos, ácidos fenólicos, terpenos y alcaloides.

Los productos alelopáticos son liberados de la planta en una variedad de formas. Pueden ser lavados de las hojas verdes, lixiviados de las hojas secas, volatilizados de las hojas, exudados de las raíces, o liberados de los residuos vegetales durante la descomposición. Aún las flores, los frutos y las semillas pueden ser fuentes de toxinas alelopáticas. También hay casos en que los productos no presentan toxicidad, situación que cambia cuando son alterados al ser liberados al ambiente, ya sea por la degradación química natural o por su conversión en productos tóxicos por la actividad de ciertos microorganismos.

En los ecosistemas naturales, la alelopatía puede ayudar a explicar algunos fenómenos importantes:

- la dominancia de una sola especie o grupo de especies sobre otras
- el cambio sucesional y el reemplazo de especies, o el mantenimiento de un estado retrasado en el proceso de sucesión
- la reducida productividad del ecosistema, y

- el patrón característico de distribución de las especies vegetales en el ambiente.

En los agroecosistemas, la alelopatía puede tener importantes funciones en el control biológico, el diseño de sistemas de cultivos intercalados y en el manejo de la rotación de los cultivos. Ejemplos de esto se presentan a continuación y, con mayor detalle, en los últimos capítulos.

Comparación de Tipos de Interferencia

El Cuadro 11.2 proporciona un breve resumen de las características más sobresalientes de cada tipo de interferencia. El estudio de este cuadro puede revelar que el agrupamiento de interferencias en los tipos de remoción y adición, no agota las formas en las cuales este tipo de interacciones puede ser clasificado. El mutualismo, por ejemplo, comparte con la competencia la propiedad de incluir funciones simétricas; esto es, el organismo que crea la interferencia es simultáneamente el organismo que recibe la interferencia generada por el otro organismo en la interacción. Otros ejemplos son el parasitismo y el epifitismo, pues ambos involucran interferencias que actúan directamente en el cuerpo del otro organismo más que sobre el ambiente físico externo. Estas observaciones sugieren que las interferencias pueden ser agrupadas como directas o indirectas y como simétricas y asimétricas. La alelopatía, por ejemplo, es asimétrica e indirecta. El Cuadro 11.3 muestra la tipología resultante de tal clasificación. La mayoría de las formas de interferencia ocupa solamente una célula en la matriz, pero la protooperación y el mutualismo pueden ser tanto directos como indirectos.

Las Interferencias en los Agroecosistemas

En la mayoría de las interacciones multiespecíficas, las plantas remueven y adicionan cosas al ambiente, simultáneamente. Es muy difícil separar las interacciones de remoción y adición, mucho menos, mostrar cómo pueden interactuar para determinar cuáles especies y cuántos individuos de cada una son capaces de coexistir en un hábitat específico. A final de cuentas, la combinación de los tipos de interferencia juega un papel importante en la determinación de la estructura y función del ecosistema.

CUADRO 11.2 Resumen de interacciones de interferencia

	Generador de la interferencia (A)	Receptor de la interferencia (B)	Tipo e identidad de la interferencia	Localización de la interferencia	Efecto en A*	Efecto en B*
Competencia	Papeles intercambiables	Papeles intercambiables	Remoción de recursos	Hábitat compartido	- -	-
Parasitismo	Parásito	Hospedante	Remoción de nutrimentos	Cuerpo del hospedante	+	-
Herbivorismo	Herbívoro	Planta consumida	Remoción de biomasa	Cuerpo de la planta consumida; hábitat	compartido +	- o +
Epifitismo	Hospedante	Epífita	Adición de superficie de hábitat	Cuerpo del hospedante	0	+
Protocooperación	Papeles intercambiables	Leer papeles intercambiables	Adición de material o estructura	Hábitat compartido o cuerpo de A/B	+ (0)	+ (0)
Mutualismo	Papeles intercambiables	Papeles intercambiables	Adición de material o estructura	Hábitat compartido o cuerpo de A/B	+ (-)	+ (-)
Alelopatía	Planta alelopática	Asociados potenciales en el hábitat	Adición de compuestos activos	Hábitat del organismo A	+ ó 0	+, -, ó 0

*Los símbolos entre paréntesis se refieren a los efectos cuando el organismo no está en interacción con el otro.

CUADRO 11.3 Tipos de interferencia

	Directa (ocurre en el cuerpo de uno o ambos organismos)	Indirecta (se presenta en los hábitats compartidos por los organismos)
Simétrica (ambos organismos generan interferencia)	Protocooperación Mutualismo	Competencia Protocooperación Mutualismo
Asimétrica (interferencia creada por uno de los organismos)	Herbivorismo Parasitismo Epifitismo	Alelopatía

Es fácil imaginar cómo la alelopatía y la competencia, por ejemplo, pueden en conjunto tener injerencia en un sistema de policultivo. Los miembros de la asociación están de manera simultánea añadiendo materiales y removiendo recursos del ambiente, modificando las condiciones microclimáticas de ese ambiente al mismo tiempo, e interactuando con cada organismo de manera que permiten la coe-

xistencia o la interdependencia mutualista favorable. No obstante, es importante entender los mecanismos de cada interacción, empezando con los impactos de cada especie sobre el ambiente en el cual crecen. La habilidad de los agricultores para manejar exitosamente las complejas asociaciones de cultivos y las rotaciones dependen del desarrollo de este entendimiento.

MODIFICACIÓN ALELOPÁTICA DEL AMBIENTE

Hasta hace muy poco tiempo, la investigación ecológica ha puesto mayor énfasis en las interacciones competitivas. Esto se ha dado especialmente en agronomía, donde se han hecho grandes esfuerzos para entender cuáles son las condiciones ambientales que limitan el desarrollo óptimo del cultivo, y qué tipo de insumos o tecnologías se necesitan para corregir la situación cuando algo que el cultivo necesita se pierde o su aporte es escaso. El arreglo y las densidades han sido investigadas y desarrolladas para evitar los efectos de la competencia.

Sólo en años recientes, se ha dado mayor atención a la interferencia por adición de la alelopatía. El creciente deseo de reemplazar los insumos químicos sintéticos en los agroecosistemas con materiales producidos naturalmente ha provocado un incremento en la investigación aplicada sobre alelopatía, especialmente en Europa y la India. La alelopatía constituye un excelente ejemplo de cómo la investigación que se enfoca sobre el mecanismo de la inter-

ferencia, puede tener importantes aplicaciones en la agroecología. Debido a que la alelopatía tiene tal importancia en la investigación agroecológica y para la sostenibilidad, el resto de este capítulo se dedicará a explorarla en mayor detalle.

Existen muchos efectos alelopáticos posibles de las arvenses y de los cultivos que se deben considerar en el manejo del agroecosistema. La producción y liberación de sustancias químicas fitotóxicas puede originarse en ambos tipos de plantas, lo que puede jugar papeles importantes en la selección de cultivos, manejo de arvenses, rotaciones de cultivos, el uso de cultivos de cobertura y el diseño de policultivos. Muchos ejemplos de estas interacciones están publicándose en la nueva revista internacional *Allelopathy Journal*.

Nuestro propósito en esta sección es profundizar en los mecanismos de las interacciones alelopáticas. Las implicaciones y aplicaciones de estas interacciones serán exploradas con mayor detalle en el Capítulo 13.

TEMA ESPECIAL

La Historia del Estudio de la Alelopatía

Los efectos de la alelopatía han sido observados desde los tiempos de los Griegos y los Romanos, cuando Theophrastus sugirió que los "olores" del brócoli ocasionaban que las plantas de vid se "marchitaran y decayeran" (Willis 1985). Fuentes japonesas que datan aproximadamente del año 1 600 documentan, de forma independiente, lo que ahora sabemos de las interacciones alelopáticas, además de que tal conocimiento pudo haberse desarrollado también de manera independiente en otras áreas.

En Europa, las observaciones científicas de interacciones alelopáticas en plantas no fueron realizadas hasta el siglo XVII, cuando A.P. De Candolle publicó un trabajo fundamental describiendo sus observaciones de la excreción de gotas de algún tipo en las raíces de *Lolium temulentum*. De Candolle creyó que las plantas usaban sus raíces como órganos excretorios, y que tales excreciones contenían sustancias químicas que se depositaban en el

suelo y afectaban el subsecuente crecimiento de la planta. Su teoría gozó de gran aceptación hasta que Justus Von Liebig desarrolló su teoría de la nutrición mineral, cambiando entonces el enfoque de las interacciones entre plantas hacia el agotamiento de los nutrientes y la competencia.

No fue sino hasta finales del siglo XIX, que cuidadosos experimentos realizados en los Estados Unidos e Inglaterra, demostraron científicamente que la alelopatía era una interacción vegetal importante. En Inglaterra, se encontró que ciertos pastos impactaban negativamente el crecimiento de los árboles cercanos; la investigación indicó que los efectos no podían ser atribuidos a un agotamiento de los nutrientes. De hecho, los lixiviados del suelo provenientes de maceteros en los cuales se plantaron los pastos, tuvieron efecto sobre los árboles tanto como los pastos por sí mismos. En los Estados Unidos, Schreiner y colaboradores publicaron una serie de artículos entre 1907 y 1911, documentando el agotamiento de los suelos plantados de manera continua con un sólo cultivo y la extracción de las sustancias químicas responsables de tal efecto. Esta fue la primera vez que los

investigadores demostraban la habilidad de las sustancias químicas de una planta para inhibir la germinación y el crecimiento de las plántulas de otras especies vegetales.

Durante los años 20, algunos trabajos importantes se enfocaron en el nogal negro. Cook documentó la habilidad de los árboles de esta especie para inhibir las plantas cercanas; Massey encontró que un extracto del nogal negro, disuelto en agua, provocaba el marchitamiento de plantas de tomate.

En 1937, el término *alelopatía* fue acuñado por Molisch, para describir cualquier interacción bioquímica entre plantas y microorganismos, ya fuese po-

sitiva o negativa. Poco más tarde, los estudios realizados por Benedict, Bonner y Galston; Evenari, y McCalla y Duley documentaron de nuevo los efectos quimiotróficos de las plantas, popularizándose entonces el concepto de alelopatía (Willis 1985).

Muller introdujo el concepto de interferencia en 1969 como una forma de explicar tanto la competencia como la alelopatía en una sola teoría. Los ecólogos reconocen ahora que los efectos competitivos y alelopáticos pueden trabajar en conjunto en cualquier sistema específico, y que las interacciones alelopáticas pueden ser particularmente importantes en los sistemas de policultivo (Rice 1984).

Demostrando la Alelopatía

Para que la alelopatía sea considerada totalmente como una interacción de interferencia, deben seguirse los siguientes pasos:

1. Determinar la presencia de un compuesto con potencial aleloquímico en la planta y en la parte que se sospecha se encuentra. Un procedimiento común para hacer esta prueba es un sistema de monitoreo que emplee algún tipo de bioensayo (Leather y Einhellig 1986). Un bioensayo positivo puede usarse solamente para determinar que la planta sí posee una sustancia activa con potencial alelopático.
2. Mostrar que los compuestos son liberados desde la planta donadora.
3. Determinar que los compuestos se acumulan o concentran en niveles tóxicos en el ambiente.
4. Mostrar que los organismos blanco toman o absorben los compuestos.
5. Demostrar que en el campo se presenta la inhibición (o estimulación) de las especies blanco.
6. Identificar los compuestos químicos y determinar las bases fisiológicas para la respuesta.
7. Finalmente, determinar cómo interactúan los compuestos alelopáticos con otros factores en el ambiente, reduciendo o incrementando sus efectos. (Es muy raro que un compuesto alelopático ocasione la muerte de otro organismo por sí mismo).

En situaciones ideales, todos estos pasos deberían cumplirse antes de intentar manejar la alelopatía en un agroecosistema específico. No obstante, la mayoría de las veces esta intensidad de investigación no es posible, mientras que los agricultores se enfrentan con la necesidad de tomar decisiones en su parcela día con día. Sin embargo, una observación astuta, unida con resultados de la investigación, puede hacer que la alelopatía se convierta en una herramienta más para el manejo del ambiente en el que se desarrollan los cultivos, para el beneficio de los mismos.

Efectos Alelopáticos de las Arvenses

Las arvenses son responsables de la pérdida de la producción de cultivos en todo el mundo. En la literatura abundan reportes sobre los "efectos competitivos" de las arvenses, pero rara vez la alelopatía es considerada o aún mencionada como uno de los mecanismos por los cuales las arvenses tienen un impacto sobre los cultivos. Dado que las arvenses y los cultivos están juntos en el mismo terreno, muchas formas posibles de interferencia actúan de forma simultánea o en secuencia. Se ha sugerido que gran número de arvenses tienen potencial alelopático (Putnam y Weston 1986). Se necesita enfocar la investigación sobre el mecanismo de liberación de los compuestos potencialmente fitotóxicos al ambiente, cómo son tomados por los cultivos, y la forma en que estos compuestos inhiben los cultivos, así como alternativas para aminorar el efecto negativo de los alelopáticos.

Los compuestos alelopáticos liberados por las arvenses pueden influenciar directamente la germinación y emergencia de las semillas de los cultivos, el crecimiento y desarrollo de estos, y la salud de los simbiontes asociados al cultivo en el suelo. Un ejemplo de una arvense alelopática es el pasto (*Paspalum conjugatum*), una arvense agresiva en los sistemas de cultivo anuales en Tabasco, México. La Figura 11.4 ilustra el efecto inhibitorio del pasto cuando está presente en un campo de maíz. A medida que se incrementa la dominancia del pasto, el decaimiento del maíz se hace más notable, alcanzando un punto donde el maíz ya no es capaz de establecerse cuando el pasto alcanza su máxima densidad.

Los extractos acuosos del pasto seco, que todavía no habían sido lavados por las lluvias, mostraron la habilidad para afectar tanto la germinación como el crecimiento inicial de la semilla de maíz. Los agricultores locales reconocen los impactos negativos del pasto en el suelo, refiriéndose a ello como efectos del calor, que pudiesen causar el decaimiento o amarillamiento del cultivo. Cuando los investigadores no pudieron encontrar diferencias en la temperatura del suelo, se empezó a sospechar de la alelopatía. Aunque la evidencia no es suficiente para excluir la interferencia competitiva del pasto, los efectos inhibitorios persisten aún cuando los agricultores aplican fertilizantes químicos al cultivo en las dosis recomendadas y la lluvia es más que suficiente.

En un estudio en California, se evaluaron dos arvenses comunes- *Chenopodium album* y *Amaranthus retroflexus*- para determinar su potencial alelopático contra el frijol (*Phaseolus vulgaris*). Ambas especies mostraron potencial alelopático en bioensayos en laboratorio; en el campo se encontró que las plantas de frijol que crecieron en presencia del amaranto, presentaban decaimiento, pero tenían un número normal de nódulos de la bacteria simbiote *Rhizobium*. Por su parte, las plantas de frijol que crecieron en presencia de *Chenopodium* también presentaron decaimiento, pero además se había reducido grandemente el número de nódulos (Espinosa 1984). Estos re-

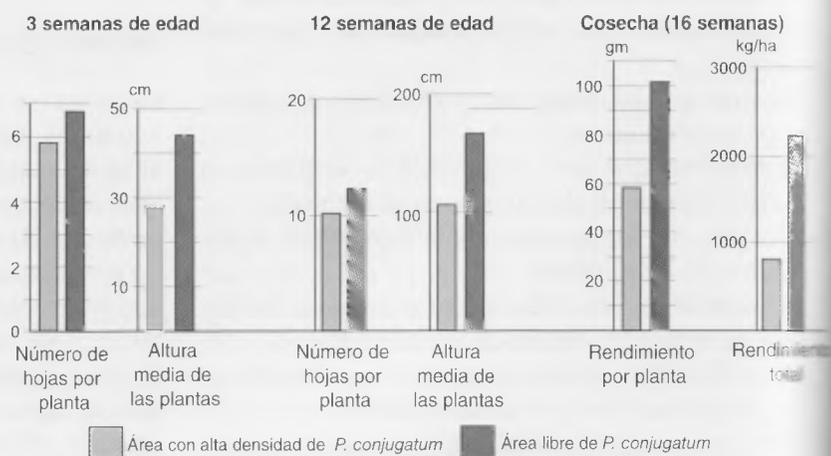


FIGURA 11.4
Inhibición alelopática de maíz por el pasto (*Paspalum conjugatum*).
Tabasco, México. La lluvia lava las fitotoxinas de las partes vivas y muertas del pasto, también las raíces exudan compuestos adicionales.
 Fuente: Gliessman (1979).

Estudios mostraron que las sustancias químicas liberadas por las dos arvenses impactaron al cultivo en diferentes formas: en un caso, afectando el crecimiento del frijol directamente, y en el otro, inhibiendo la actividad de la bacteria fijadora de Nitrógeno. Dado que el campo de cultivo fue irrigado, había sido fertilizado recientemente, y el espaciamiento entre plantas aseguró que el frijol recibiera suficiente luz, la interferencia por remoción probablemente fue mínima. De nuevo, se necesita más investigación para entender los mecanismos específicos, pero existe suficiente información para demostrar la inhibición del cultivo a través de la interferencia por adición alelopática.

Una especie de arvense que ha sido estudiada en gran detalle para demostrar sus mecanismos alelopáticos es el pasto *Agropyron repens*. Los siguientes hallazgos son descritos en una revisión hecha por Putnam y Weston (1986):

- El pasto inhibió varios tipos de cultivo (ejemplo, trébol, alfalfa, cebada) y esta inhibición no pudo ser explicada por una interferencia por remoción.
- Bioensayos en laboratorio e invernadero demostraron el potencial inhibitorio del follaje y de los rizomas del pasto, aunque los residuos del follaje fueron doblemente tóxicos que el material rizomatoso. Tanto los extractos de agua como los residuos incorporados al suelo fueron fitotóxicos.
- Hay cierta evidencia que indica que la mayor inhibición ocurre en la presencia de hongos del suelo.
- Los residuos del pasto en descomposición producen inhibidores solubles en agua, lo que explica la inhibición que ha sido observada cuando los residuos del pasto constituyen una parte significativa de los sistemas de no labranza.
- La inhibición de la nodulación en leguminosas y la reducción de la formación de pelos radicales en otras plantas parecen ser los mecanismos de inhibición.
- Se han aislado e identificado varios compuestos a partir de los extractos acuosos y residuos en descomposición, que incluyen varios ácidos fenólicos, glicósidos, un compuesto conocido como agropyreno, una flavotricina y compuestos relacionados.
- Aun cuando el pasto muere, como resultado de la aplicación de herbicidas, los residuos de la planta y las toxinas en el suelo deben degradarse para que el siguiente cultivo pueda establecerse exitosamente.

El caso de este pasto demuestra que la interferencia alelopática puede ser muy importante, pero también sugiere que diferentes partes de la planta pueden jugar papeles diferentes, y que los compuestos fitotóxicos pueden entrar al ambiente mediante diferentes mecanismos, así como tener varios impactos en los cultivos.

Efectos Alelopáticos de los Cultivos

Aunque gran parte de la investigación se ha enfocado sobre el potencial alelopático de las arvenses en los agroecosistemas, se ha determinado que muchos cultivos también liberan fitotoxinas. Este mecanismo de interacción ofrece importantes posibilidades a los agricultores en la búsqueda de prácticas alternativas de manejo.

Cultivos de Cobertura

Los cultivos de cobertura crecen usualmente durante un periodo de descanso en el campo de cultivo, con el fin de proteger el suelo de la erosión, contribuir con materia orgánica para el suelo, mejorar las condiciones del suelo para la penetración del agua y su retención y para "cubrir" a las arvenses. Los cultivos de cobertura de trigo, cebada, avena, centeno, sorgo y pasto Sudán (*Sorghum sudanense*), se han usado efectivamente para suprimir arvenses, principalmente anuales de hoja ancha. La capacidad para suprimir arvenses de muchos de estos y otros cultivos de cobertura se debe, al menos en parte, a la aleopatía (Overland 1966).

En particular, el potencial alelopático del centeno de invierno (*Secale cereale*) ha sido muy estudiado (Barnes *et al.* 1986). El centeno produce una considerable biomasa al principio de la estación de crecimiento, y ha tenido mucho éxito como abono verde en suelos pobres. Pero es más notable por su habilidad para suprimir el crecimiento de las arvenses cuando está en activo desarrollo, así como cuando sus residuos son incorporados al suelo con la labranza, o cuando simplemente son dejados sobre el suelo después de cortar las plantas. Sus efectos alelopáticos se presentan aún después de que sus residuos son dejados en el suelo, después de que la aspersión de herbicidas causó la muerte del cultivo de cobertura. Un análisis químico común ha identificado los probables agentes

fitotóxicos: dos benzoxalinonas y productos derivados de la degradación de las mismas.

Se ha demostrado que el cultivo de cobertura conocido como frijol terciopelo (*Mucuna pruriens*, sin. *Mucuna deeringiana*), usado extensivamente en las zonas rurales de Tabasco, México, inhibe las arvenses mediante la alelopatía. Esta leguminosa trepadora anual es sembrada entre el cultivo de maíz casi al final del ciclo de cultivo. Esta cubre los espacios abiertos entre las plantas de maíz, suprimiendo de manera eficaz el crecimiento de las arvenses, antes y después de la cosecha. La supresión de las arvenses se debe en parte a la sombra, pero la liberación de compuestos alelopáticos también juega su papel. Después de que

las plantas de frijol terciopelo completan su ciclo de vida son dejadas en el terreno, cubriendo el suelo con una cobertura rica en nitrógeno, a través del cual será sembrado el siguiente cultivo de maíz. De esta manera se manejan grandes áreas sin el uso de fertilizantes o herbicidas (Gliessman y García 1982).

A medida que se genere mayor información sobre los mecanismos de la liberación de las fitotoxinas en los cultivos de cobertura, los agricultores podrán optimizar el uso de estos cultivos para el control de arvenses, maximizando la aplicación de los compuestos químicos al suelo y mejorando la sincronización de su incorporación. Dado que los cultivos varían de región a región, será necesario también entender cómo los climas locales afectan el mecanismo de liberación de las toxinas al ambiente, donde pueden afectar a las arvenses. La selección apropiada de las especies de cobertura; así como su manejo varía según lo anterior.

Coberturas Orgánicas Derivadas de los Cultivos

Los materiales vegetales y los residuos de los cultivos pueden ser transportados a los terrenos de cultivo y dispersados sobre el suelo, funcionando como cobertura orgánica. El material vegetal de desecho de los



FIGURA 11.5

Mazorcas de cacao molidas son usadas como cobertura alelopática, Tabasco, México. Las "mazorcas" maceradas de cacao, de tono oscuro en la fotografía, entre surcos de zucchini, suprimen el crecimiento de las arvenses.

campos agrícolas o del procesamiento de los productos agrícolas es especialmente útil para este propósito. El valor de tales materiales fue discutido cuando se habló de las enmiendas del suelo (Capítulo 8), pero un beneficio importante de muchas coberturas que comúnmente no se considera es su potencial para el control alelopático de arvenses.

Un ejemplo excelente de lo anterior es el uso de las "mazorcas" de cacao maceradas y secadas después de que se les han extraído las semillas y la pulpa durante el proceso de fabricación de cacao en polvo. Distribuidas sobre la superficie del suelo o entre las plantas establecidas, las "mazorcas" maceradas liberan taninos que pueden inhibir la germinación y el establecimiento de las arvenses. Bioensayos de laboratorio con extractos acuosos del material de las "mazorcas", muestran que tienen un considerable potencial alelopático. Otros tipos de cultivo y procesamiento de residuos con potencial alelopático son: la cáscara seca de los granos de café, las cáscaras de la almendra, la cascarilla del arroz, el bagazo de la manzana, y la piel y las semillas de las uvas.

Las cáscaras del nogal fueron una de las partes vegetales estudiadas inicialmente en detalle para determinar su potencial alelopático, dado que desde hace

CUADRO 11.4 Elongación inicial de la raíz de semillas germinadas de dos arvenses y dos cultivos en bioensayos de laboratorio con extractos de la hoja de calabaza

Especies blanco	Agua destilada: control ¹	Extracto de hoja de calabaza al 2,5% ²	Extracto de hoja de calabaza al 5% ²
<i>Avena fatua</i>	100%	61%	40,1%
<i>Brassica kaber</i>	100%	48,2%	30,7%
<i>Raphanus sativa</i>	100%	112,1%	57,1%
<i>Hordeum secale</i>	100%	122%	57,8%

¹La elongación de la raíz después de 72 horas, a 25°C, en agua destilada, fue definida como 100% de crecimiento.

²Hojas intactas de calabaza secadas al aire fueron colocadas en agua destilada por dos horas, y la solución resultante fue filtrada y usada para irrigar las semillas. La concentración se basó en la relación de gramos de hoja de calabaza por gramos de agua.

Fuente: Gliessman (1988a).

largo tiempo se ha notado que muy pocas plantas de otro tipo (especialmente arvenses), podían crecer bajo los árboles del nogal en aquellos sitios donde, por la cobertura externa del nogal, las nueces podían caer durante la maduración del fruto.

Inhibición de Arvenses por el Cultivo

Cuando una planta cultivada es capaz por sí misma de inhibir a las arvenses mediante la aleopatía, entonces los agricultores tienen una herramienta muy importante que pueden agregar a su caja de herramientas. Se sabe que varios cultivos son eficientes en suprimir las arvenses que crecen cerca de ellos (Worsham 1989). La lista incluye: remolacha (*Beta vulgaris*), lupino (*Lupinus* sp.), maíz, trigo, avena, chícharo, alforfón (*Fagopyrum esculentum*), sorgo (*Panicum* sp.), cebada, centeno y pepino (*Cucumis sativa*). La aleopatía puede estar implicada en todos estos casos, pero es necesario la investigación para determinar sin lugar a dudas la función que las fitotoxinas tienen en la relación con otras formas de interferencia. En algunos casos, la inhibición parece presentarse por la liberación de sustancias de los cultivos vivos, pero en otros parece que el efecto se da a partir de los productos de la descomposición de los residuos incorporados en el suelo al final del ciclo de cultivo. Se debe tener cuidado para mantener estos efectos inhibitorios sobre las arvenses y no sobre los cultivos subsecuentes. Las combinaciones de estos cultivos podrían expresar aún mayor actividad aleopática por la combinación complementaria de fitotoxinas. La calabaza ha sido reconocida como un

cultivo alelopático especialmente eficaz (Gliessman 1983). La lluvia lava los compuestos inhibitorios de las grandes hojas horizontales y una vez en el suelo, estos compuestos pueden suprimir las arvenses. La sombra que las hojas proporcionan probablemente mejora el efecto, combinando una interferencia por remoción con una interferencia por adición. Los bioensayos muestran el potencial alelopático de los ex-

tractos acuosos de las hojas intactas en un amplio rango de especies, siendo las arvenses por lo general inhibidas en mayor proporción que los cultivos (Cuadro 11.4). Cuando la calabaza es asociada a un agroecosistema de cultivos múltiples, como cuando se siembra junto con maíz y frijol, asume el importante papel de supresor de arvenses para todo el conjunto de especies asociadas.

Otras investigaciones han demostrado que las variedades más antiguas de algunos cultivos, especialmente aquellas más relacionadas con sus parientes silvestres, muestran el mayor potencial alelopático (Putnam y Duke 1974). La hibridación de cultivos pudo haber seleccionado contra el potencial alelopático a cambio de los mayores rendimientos del cultivo. El monitoreo de tipos alelopáticos en las colecciones de germoplasma de cultivos, podría conducir a la incorporación de un mayor potencial alelopático en los tipos actuales, mediante el cruce convencional de cultivos o por el uso de estrategias de recombinación genética desarrolladas más recientemente.

Considerando los problemas asociados con las estrategias usadas regularmente para el control de arvenses —posible contaminación ambiental, contaminación del manto freático, incremento en el costo del desarrollo y prueba de nuevos herbicidas, incremento en la resistencia a los herbicidas por las arvenses, y las dificultades de registro de nuevos herbicidas— el potencial alelopático en los cultivos se convertirá en una alternativa más atractiva. Relacionando el potencial alelopático de las plantas con el entendimiento de las características y actividad de los compuestos fitotóxi-



cos una vez que han sido liberados de la planta que los produce, hará a estas alternativas más útiles.

Estimulación del Crecimiento

El énfasis en la discusión anterior está dado principalmente sobre los impactos inhibitorios o negativos de los productos químicos añadidos al ambiente por las plantas. Sin embargo, hay pocos reportes de compuestos liberados por las plantas al ambiente que tienen efectos estimulantes en otras plantas alrededor de ellas. Tales interferencias por adición pueden ser clasificadas también como alelopatía, dado que el término concebido originalmente incluía tanto los efectos positivos como los negativos.

En algunos casos, las concentraciones bajas de compuestos químicos que en otras circunstancias serían inhibitorios, pueden tener un efecto estimulante. Los bioensayos para determinar el potencial alelopático, con extractos en concentraciones bajas, por lo común muestran incremento en la elongación de la raíz. En otros casos, las plantas producen compuestos con un efecto estimulante. Por ejemplo, en un estudio reportado en una revisión por Rice (1984), se encontró que una arvense conocida como nequilla del maíz (*Agrostemma githago*) tiene un efecto estimulante apreciable en los rendimientos de trigo cuando crece en asocio con éste, en comparación con los obtenidos cuando el trigo crece sólo. Una sustancia estimulante aislada de la arvense fue llamada agrostemina, y cuando fue aplicada en forma separada a los campos de trigo se incrementó el rendimiento de este cultivo, tanto en áreas fertilizadas como en las no fertilizadas. Rice también publicó el resultado de un trabajo donde se añadió al suelo alfalfa picada, lo que estimuló el crecimiento de tabaco, pepino y lechuga, identificándose como estimulante a una sustancia llamada triacantanol. Asimismo, algunas sustancias aisladas de las arvenses tienen efectos estimulantes en ciertas concentraciones. Los investigadores tienen como reto demostrar las maneras en que algunos de estos efectos pueden ser incorporados de forma práctica dentro del sistema de manejo del cultivo, pero el potencial ciertamente existe dado que los mecanismos completos de la interferencia están trabajando.

CONCLUSIONES

Los organismos pueden tener entre sí influencias tanto positivas como negativas, dependiendo de la naturaleza de sus interacciones. Estas interacciones tienen impactos dinámicos y potencialmente importantes sobre el ambiente en los agroecosistemas. Este Capítulo propuso un modelo para el estudio y entendimiento de tales interacciones que se centran en los mecanismos mediante los cuales un organismo añade o remueve de su ambiente inmediato algún recurso o material, lo cual puede tener consecuencias para los otros organismos que viven allí. El manejo de estos factores de interacción, de manera que contribuyan a la sostenibilidad del agroecosistema como un todo, es un reto para la investigación futura.

Ideas para Meditar

1. Describa una situación donde un organismo parezca estar compitiendo por un espacio específico en el ambiente, pero que en verdad esté compitiendo por recursos limitados o potencialmente limitantes en ese espacio.
2. ¿Por qué el modelo organismo-ambiente-organismo para el entendimiento de los mecanismos de las interacciones bióticas, tiene gran importancia potencial para diseñar agroecosistemas sostenibles.
3. Describa una situación que usted conozca en la que la alelopatía juegue un papel importante en el desarrollo de una estrategia alternativa para el manejo de las arvenses en el agroecosistema.
4. ¿Cómo diferenciaría usted entre la influencia de un factor abiótico sobre un organismo y la influencia de otro organismo sobre el primero?
5. ¿Cuáles son algunas maneras de evitar la competencia en un agroecosistema?

Lecturas Recomendadas

- Abrahamson, W. G. 1989. *Plant-Animal Interactions*. McGraw Hill: New York.
Revisión que comprende los tipos de interacciones planta-animal en los ecosistemas y su posible importancia coevolutiva.

Allen, M. F. 1991. *The Ecology of Mycorrhizae*. Cambridge University Press: New York.

Estudio sobre el importante papel que juega la simbiosis raíz-hongo en el ecosistema.

Chou, C. H. and G. R. Waller (eds). 1989. *Phytochemical Ecology: Allelochemicals, Mycotoxins and Insect Pheromones and Allomones*. Institute of Botany, Academia Sinica Monograph Series No. 9, Taipei, Taiwan.

Importante colección de reportes de investigaciones y revisiones del papel ecológico de los compuestos químicos naturales de las plantas en un ámbito de interacciones en los ecosistemas.

Darwin, Charles. 1979. *The Illustrated Origin of Species*. Abridged and Introduced by R. E. Leakey. Hill and Wang: New York.

Un clásico de la literatura científica, presentado en una manera muy fácil de leer y bellamente ilustrada; relaciona la hipótesis de Darwin con los avances científicos de los años recientes, haciendo énfasis en las interacciones entre especies.

Daubenmire, R. F. 1974. *Plants and Environment*. Second edition. John Wiley and Sons: New York.

Libro de texto de autoecología, con varios capítulos que enfatizan el papel de las interacciones bióticas como factores en el ambiente.

Grace, J. B. and D. Tilman (eds.). 1990. *Perspectives on Plant Competition*. Academic Press: San Diego, CA.

Compilación de los reportes de investigaciones y revisiones sobre el concepto de la competencia en los ecosistemas.

Putnam, A. R. and C. S. Tang (eds.). 1986. *The Science of Allelopathy*. John Wiley and Sons: New York.

Una evaluación de los métodos de investigación y enfoque para el estudio de la alelopatía en plantas, con secciones dedicadas en específico al papel de la alelopatía en la agricultura.

Radosevich, S. R. And J. S. Holt. 1984. *Weed Ecology*. John Wiley and Sons: New York.

Excelente evaluación del papel ecológico de las arvenses en los agroecosistemas, con una visión hacia el manejo de las mismas más que a su control.

Real, L. (ed.). 1983. *Pollination Biology*. Academic Press: Orlando, FL.

Excelente volumen editado sobre esta importante interacción planta-insecto, con énfasis en la polinización como una fuerza evolutiva.

Rice, E. L. 1984. *Allelopathy*. Second Edition. Academic Press: Orlando FL.

Referencia clave sobre la significancia ecológica de la alelopatía en ecosistemas naturales y manejados.

Trager, W. 1986. *Living Together: The Biology of Animal Parasitism*. Plenum: New York.

Tratado sobre un factor biótico muy importante en los ecosistemas, pero comúnmente minimizado.

Waller, G. R. (ed.). 1987. *Allelochemicals: Role in Agriculture and Forestry*. ACS Symposium Series 330. American Chemical Society: Washington, D.C.

Colección de reportes de investigación y revisiones sobre la forma en que los productos químicos producidos por las plantas, pueden jugar importantes papeles ecológicos en los ecosistemas manejados por el hombre.

EL COMPLEJO AMBIENTAL

Los capítulos anteriores han considerado las influencias de forma separada de los factores ambientales individuales- luz, temperatura, precipitación, viento, suelo, humedad del suelo, fuego y otros organismos- sobre la planta cultivada. Aunque es importante entender el impacto que cada uno de estos factores tiene por sí mismo, rara vez cualquiera de estos factores opera por sí solo o en una manera consistente sobre el organismo. Aún más, todos aquellos factores que han sido discutidos como componentes separados del ambiente también interaccionan entre ellos y afectan a cada uno de los otros. Es por ello que, el ambiente en el cual un organismo individual vive, necesita ser entendido como un conjunto dinámico y siempre cambiante de todos los factores ambientales interactúan- es decir, como un **complejo ambiental**.

Cuando todos los factores que confrontan un cultivo cultivado son considerados en conjunto, es posible examinar las características ambientales que emergen sólo de la interacción de estos factores. Estas características- que incluyen complejidad, heterogeneidad y cambio dinámico- son los temas principales de este Capítulo. El examinarlos en términos de su impacto sobre el cultivo representa el paso final al analizar los agroecosistemas autoecológicamente, y nos prepara para el nivel sinecológico de análisis que empieza en el siguiente Capítulo.

EL AMBIENTE COMO UN COMPLEJO DE FACTORES

El ambiente de un organismo puede ser definido como la suma de todas las fuerzas externas y factores, tanto bióticos como abióticos, que afectan el crecimiento, estructura y reproducción de dicho organismo. En los agroecosistemas, es vital entender qué factores en este ambiente- debido a su condición o ni-

vel en ese momento- podrían estar limitando a un organismo y conocer qué niveles de ciertos factores, son necesarios para un funcionamiento óptimo. El diseño y manejo de agroecosistemas están basados en gran medida en dicha información. Los fundamentos de este entendimiento fueron presentados en los capítulos iniciales de este libro. Los factores individuales han sido analizados y se han revisado muchas opciones agrícolas para su manejo. Por ser el ambiente un complejo de todos esos factores, es tan importante entender cómo cada factor afecta o es afectado por otros, individualmente o en combinaciones complejas que varían en tiempo y espacio. Son las complejas interacciones de factores las que dan lugar al ambiente total del organismo.

Factorizando el Ambiente

El concepto de un complejo ambiental se presenta esquemáticamente en la Figura 12.1. Aunque las líneas que representan las conexiones no han sido dibujadas, la figura intenta mostrar que ocurren interacciones entre los factores, así como entre cada factor y el organismo cultivado. Todos los factores componentes del ambiente, discutidos en los capítulos previos están incluidos, así como algunos otros. Debido a que es imposible dividir el ambiente en componentes o incluir cada posible factor, los factores mostrados en la Figura 12.1 involucran cierta simplificación y traslape. Aún más, cada uno de los factores no tiene la misma importancia en cualquier momento dado. Por esta razón, el tiempo no está incluido como un factor independiente, sino que en vez de ello, debe ser considerado como el contexto subyacente dentro del cual el complejo entero de factores está cambiando.

Debido a la complejidad del ambiente, es claro que estos factores pueden combinarse para afectar



FIGURA 12.1

Representación del complejo ambiental. *El ambiente de una planta cultivada está conformado por la interacción de muchos factores. Aunque el nivel de complejidad del ambiente es grande, la mayoría de los factores que lo integran pueden ser manejados. Reconocer las interacciones de los factores y la complejidad total del ambiente es el primer paso hacia un manejo sostenible.*

Adaptado de Billings (1952).

los organismos en el ambiente además de hacerlo cada uno de forma independiente. Los factores pueden funcionar en conjunto simultáneamente y sinérgicamente para afectar a un organismo, o pueden hacer sentir sus efectos mediante una cascada de cambios en otros factores. Un ejemplo de dicha interacción de factores es el crecimiento suculento de las arvenses localizadas en el costado norte del surco, como se ve en la Figura 4.4. En ese sitio micro-climático particular, las menores temperaturas, la mayor humedad, la mayor actividad biológica y posiblemente la mayor disponibilidad de nutrientes están asociadas simultáneamente con la menor cantidad de sombra presente, y esta combinación de factores alteró de manera eficaz las condiciones para el crecimiento de la planta. Otro ejemplo es el compuesto alelopático liberado de las raíces de un cultivo que puede interac-

tuar con la sombra, el estrés hídrico, herbívoros, susceptibilidad a enfermedades y otros factores, pueden mejorar o reducir la efectividad de los compuestos fitotóxicos que limitan el crecimiento de las arvenses en un sistema de cultivo. Debido a dichas interacciones, a menudo es un reto predecir las consecuencias de cualquier modificación individual del agroecosistema.

Una de las debilidades del enfoque agronómico convencional de manejo de agroecosistemas, es que ignora las interacciones de los factores y la complejidad ambiental. Las necesidades del cultivo son consideradas en términos de factores individuales, aislados y entonces cada factor es manejado en forma separada para alcanzar el máximo rendimiento. El manejo agroecológico, en contraste, empieza con el sistema agrícola como un todo y diseña intervenciones de acuerdo a cómo éstos impactarán al sistema como un todo, no sólo en el rendimiento del cultivo. Las intervenciones pueden estar orientadas a la modificación de factores individuales, pero también se considera el impacto potencial sobre otros factores.

Complejidad de la Interacción

La manera en la cual un complejo de factores interactúan para impactar una planta, puede ser ilustrado por la germinación de una semilla y por el concepto "sitio seguro" de Harper (1977). Sabemos por estudios ecofisiológicos que una semilla individual germina en respuesta a un grupo específico de condiciones que ésta encuentra en su ambiente inmediato (Naylor 1984). La ubicación a escala del sitio que provee estas condiciones ha sido denominada como **sitio seguro**. Un sitio seguro provee los requerimientos exactos para una semilla individual, para la ruptura de la dormancia y para los procesos de germinación que ocurrirán. Adicionalmente, debe haber amenazas tales como enfermedades, depredadores, o sustancias tóxicas. Las condiciones del sitio seguro deben durar hasta que la plántula se vuelva independiente de las reservas originales de la semilla. Los requerimientos de la semilla durante este tiempo de cambio, así como los límites de lo que constituye un sitio seguro deben también cambiar.

La Figura 12.2 describe algunos de los factores ambientales que influyen en la germinación de una semilla y conforman el sitio seguro. Los factores que

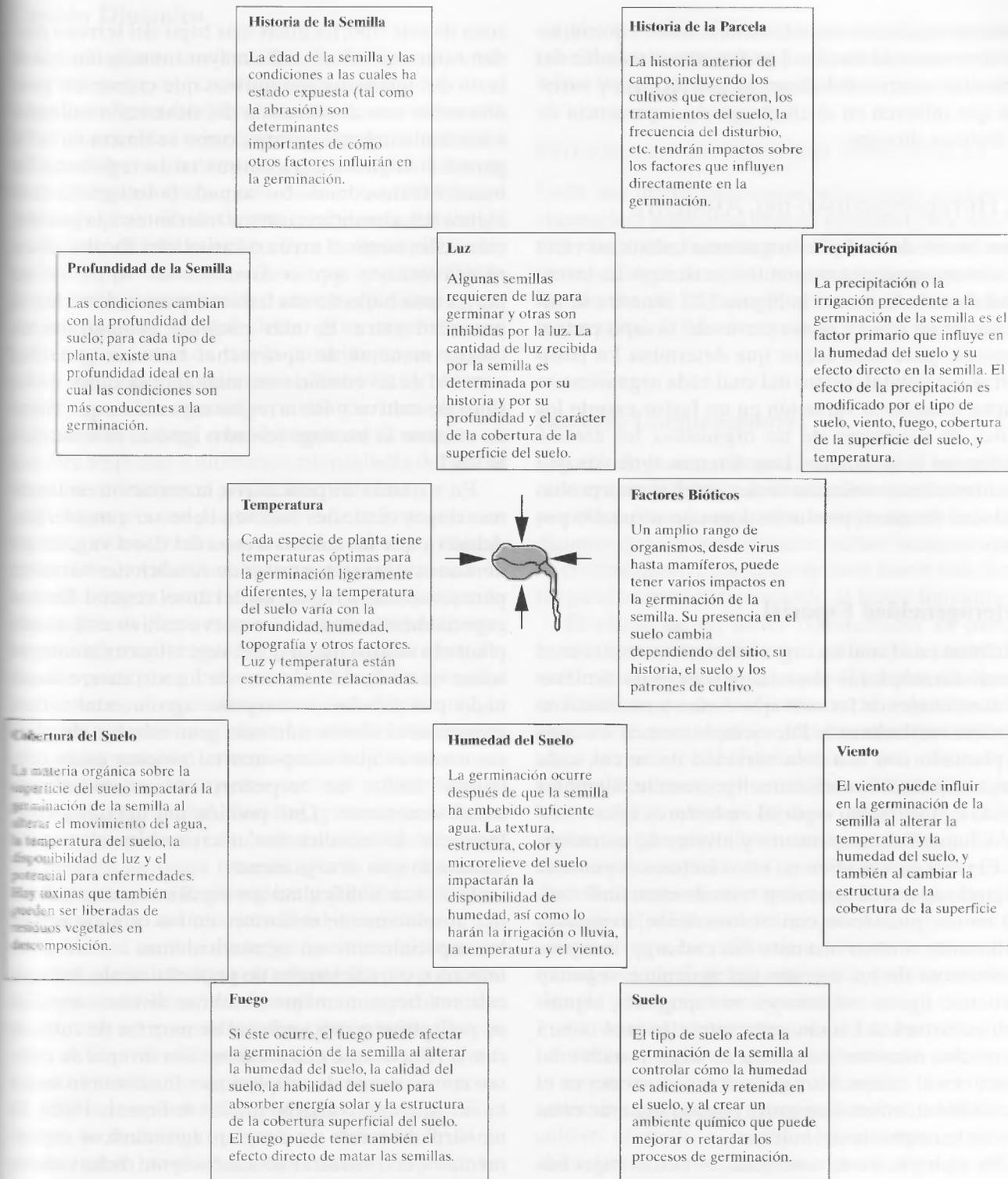


FIGURA 12.2

Factores ambientales que afectan la germinación de la semilla. Los factores que rodean inmediatamente la semilla afectan en forma directa; los factores en el perímetro externo afectan mayormente la intensidad, el nivel y la presencia de los factores directos. La importancia de cada factor variará dependiendo de la especie de la semilla.

rodean inmediatamente a la semilla son los que influyen directamente en ella. Los factores alrededor del perímetro exterior del diagrama son factores y variables que influyen en el efecto, grado, o presencia de los factores directos.

LA HETEROGENEIDAD DEL AMBIENTE

El ambiente de cualquier organismo individual varía no sólo en espacio sino también en tiempo. La intensidad de cada factor en la Figura 12.1 muestra la variación de un lugar a otro a través del tiempo, con un promedio para cada factor que determina los parámetros del hábitat dentro del cual cada organismo se adapta. Cuando la variación en un factor excede los límites de tolerancia de un organismo, los efectos pueden ser muy dañinos. Los sistemas agrícolas que consideran esta variación tienen muchas más probabilidades de que el productor logre un resultado positivo.

Heterogeneidad Espacial

El hábitat en el cual un organismo está presente es el espacio caracterizado por combinaciones particulares de intensidades de factores que varían tanto horizontal como verticalmente. Por ejemplo, aun en un campo plantado con una sola variedad de cereal, cada planta encontrará condiciones ligeramente diferentes debido a la variación espacial en factores, tales como suelo, humedad, temperatura y niveles de nutrimentos. El nivel de variación en estos factores dependerá del grado en que el agricultor trata de crear uniformidad en esa plantación con mecanización, irrigación, fertilizantes u otros insumos. Sin embargo, independientemente de los intentos del agricultor, seguirán existiendo ligeras variaciones en topografía, exposición, cobertura del suelo, entre otras, lo cual creará diferencias microambientales a lo largo y ancho del espacio en el campo. Muy pequeñas variaciones en el microhábitat, en su momento, pueden generar cambios en la respuesta del cultivo.

Por ejemplo, en un ambiente de tierras bajas húmedas tropicales, donde los suelos tienen pobre drenaje y la precipitación pluvial es alta, ligeras variaciones topográficas pueden hacer una gran diferencia en la humedad del suelo y el drenaje. En una

zona de este tipo, las áreas más bajas del terreno pueden estar sujetas a mucha mayor inundación que el resto del terreno, y los cultivos que crecen ahí pueden sufrir una disminución del desarrollo radicular y rendimientos más pobres, como se ilustra en la Figura 9.3. Algunos agricultores en la región de Tabasco, México, donde fue tomada la fotografía de la Figura 9.3, siembran cultivos tolerantes a la inundación, tales como el arroz o variedades locales de taro (*Colocassia* spp. o *Xanthosoma* spp.) en las partes más bajas de sus terrenos para aprovechar la humedad extra. Es más eficiente ecológicamente buscar maneras de aprovechar la heterogeneidad espacial de las condiciones mediante el ajuste de los tipos de cultivo y los arreglos espaciales, que tratar de reforzar la homogeneidad o ignorar la heterogeneidad.

En sistemas de policultivo, la variación en las dimensiones verticales también debe ser considerada, debido a que un cultivo o capa del dosel vegetal generalmente crearía estratos de condiciones variables para otros cultivos o capas del dosel vegetal. Esto es especialmente cierto, si un nuevo cultivo está siendo plantado dentro de un dosel vegetal ya existente, tal como en un agroecosistema de huerto casero dominado por árboles o traspatio agroforestal. Para complicar el asunto aún más, gran número de plantas maduras que componen tal sistema están ocupando todo un espectro de microhábitats simultáneamente. ¿Qué porción del hábitat y combinación de condiciones microambientales están afectando más al organismo?

Debido a la dificultad que significa crear condiciones absolutamente uniformes en los campos agrícolas, especialmente en agroecosistemas con recursos limitados o tradicionales de pequeña escala, los agricultores frecuentemente siembran diversas especies en policultivo o una variedad de mezclas de cultivos, con la idea de que una combinación diversa de cultivos con un rango de adaptaciones funcionarán mejor en un ambiente variable (Smith & Francis 1986). Es un verdadero reto en estudios agronómicos experimentales, el considerar adecuadamente dicha variabilidad. Altas desviaciones estándar no necesariamente significan que algo estuvo mal con la metodología de investigación. Esto puede simplemente significar que el área muestral fue extremadamente variable.

Cambio Dinámico

Debido a que la combinación de factores en cualquier ambiente está cambiando constantemente en el tiempo, un agricultor debe también tomar en cuenta la heterogeneidad temporal. Los cambios tienen lugar a cada hora, diariamente, estacionalmente, anualmente, e incluso como parte de cambios climáticos a más largo plazo. Parte de este cambio es acumulativo y una parte de éste es cíclico. Para cualquier factor en particular, es necesario considerar que tan rápido puede cambiar su intensidad a través del tiempo y cómo los cambios pueden afectar a un organismo en particular, de acuerdo con la duración de su exposición y sus límites de tolerancia a dicho factor. Al mismo tiempo, cada organismo, conforme transcurre su ciclo de vida, sufrirá cambios tanto en la manera en que éste responde a diferentes intensidades del factor como en su tolerancia a tales intensidades.

Por ejemplo, una planta cultivada enfrenta un ambiente continuamente cambiante conforme transcurre su ciclo de vida. Si un factor o una combinación de factores alcanza cierto nivel crítico al tiempo que la planta alcanza cierta etapa en su ciclo de vida en que es particularmente sensible, puede suprimirse su desarrollo posterior y causar la pérdida del cultivo. La germinación, el crecimiento inicial de la plántula, la floración y fructificación son los estados durante los cuales una variación extrema o inusual de los factores ambientales puede impactar con más probabilidad el desempeño del cultivo. Como se presenta en la figura 9.4, por ejemplo, un período de inundación durante el crecimiento de caupí tuvo un efecto negativo en el rendimiento, pero la naturaleza y grado de este efecto dependió de cuándo ocurrió tal inundación.

Debido al cambio dinámico, las intervenciones en el campo necesitan frecuentemente ser programadas de forma cuidadosa. Por ejemplo, un agricultor que quiera usar un quemador a base de propano (descrito en el Capítulo 10) para matar plántulas de arvenses está limitado a una pequeña ventana de tiempo en las etapas tempranas de desarrollo del cultivo. Si el cultivo es demasiado pequeño y delicado, la flama puede matar las plántulas del cultivo junto con las plántulas de las arvenses. Si el cultivo es demasiado alto, puede ser difícil evitar dañar a las plantas con el equipo lanzallamas por sí mismo. El momento efectivo para usar equipos lanzallamas para eliminar las malas hierbas, puede ser tan corto como cuatro o cin-

co días en cultivos delicados como las zanahorias o cebollas, las cuales tienen poca habilidad para sobre- llevar las interferencias por arvenses, por sí solas.

INTERACCIÓN DE FACTORES AMBIENTALES

Cada uno de los numerosos factores que conforman el complejo ambiental tiene el potencial para interactuar con otros factores y por tanto modificar, acentuar o mitigar sus efectos sobre los organismos. La interacción de factores puede tener consecuencias tanto positivas como negativas en los agroecosistemas.

Factores Compensadores

Cuando un factor sobrepasa o elimina el impacto de otro, entonces éste es denominado como **factor compensador**. Cuando un cultivo está creciendo bajo condiciones que en otra situación serían limitantes para su crecimiento o desarrollo óptimo, uno o más factores pueden estar compensando al factor limitante.

El efecto de un factor compensador es comúnmente visto en pruebas de fertilización, cuando un nutrimento particular del suelo (ejemplo, nitrógeno) es limitante, como lo demuestra la respuesta de la planta. Un crecimiento reducido y rendimientos más bajos son señales de la deficiencia. Pero, más que simplemente adicionar el nutrimento deficiente, es posible a veces alterar algunos otros factores del ambiente que posibilitan una mayor disponibilidad del nutrimento "limitado" para la planta. En el caso de la deficiencia de nitrógeno, puede ser que el pobre drenaje del suelo esté restringiendo la absorción de nitrógeno por las raíces, de tal manera que una vez que se mejora el drenaje del suelo, la falta de absorción de nitrógeno es compensada.

Otro caso de compensación de un factor limitante ocurre cuando un agricultor encuentra el impacto negativo de un herbívoro comedor de hojas, al estimular un crecimiento más frondoso o rápido del cultivo afectado, a través de una intervención tal como la adición de compost al suelo o aplicando un fertilizante foliar. La biomasa añadida puede permitir al cultivo soportar la carga herbívora y todavía producir una cosecha satisfactoria. El crecimiento adicional de la planta compensa el daño del herbívoro.

En regiones costeras, donde la neblina es común durante la estación seca del verano (ejemplo, la región marítima mediterránea de la costa California), la neblina puede compensar la falta de lluvia. Esto ocurre por la reducción en la pérdida de agua por transpiración, y menor estrés evaporativo debido a menos luz solar directa y temperaturas más bajas. Los cultivos hortícolas de hoja, comunes en las partes más bajas de los valles de Salinas y Pájaro de California, probablemente no podrían ser cultivados en forma rentable durante el verano sin tal compensación, porque estos cultivos están sujetos a pérdidas considerables de agua por la transpiración en días calientes.

Multiplicidad de Factores

Cuando varios factores están estrechamente relacionados, puede ser particularmente difícil separar el efecto de un factor del otro. Los factores pueden actuar como una unidad funcional, ya sea simultáneamente o de forma encadenada. Un factor influye o acentúa otro, el cual afecta a un tercero; pero en términos de la respuesta del cultivo, es imposible determinar dónde termina uno y empieza el otro. Los factores temperatura, luz y humedad del suelo, frecuentemente funcionan estrechamente interrelacionados. Por ejemplo, para un cultivo de maíz en un campo abierto, al aumentar los niveles de luz durante la mañana, aumenta la temperatura y la mayor temperatura aumenta la evaporación del agua del suelo, mientras la transpiración aumenta también. Por lo tanto, la intensidad de cada factor varía simultáneamente con cada cambio en la intensidad de la radiación solar, y el efecto relativo de cada factor sobre el cultivo es prácticamente inseparable de la multiplicidad de efectos que tienen en conjunto.

Predisposición a un Factor

Un factor ambiental particular puede causar una respuesta del cultivo que lo deja más susceptible al daño por otro factor. En estos casos, se dice que el primer factor predispone a la planta a los efectos del segundo factor. Por ejemplo, bajos niveles de luz causados por sombra, pueden predisponer a una planta al ataque de hongos. Los niveles de luz más bajos, usualmente significan mayor humedad relativa para la

planta y esto produce el desarrollo de hojas más largas y delgadas, que pueden volverse más susceptibles al ataque de un hongo patogénico que se presenta más cuando hay exceso de humedad en el ambiente. Similarmente, la investigación ha demostrado que algunas plantas cultivadas son más susceptibles al daño de herbívoros cuando se les ha suministrado grandes cantidades de fertilizante nitrogenado. El tejido vegetal está predispuesto a la herbivoría debido al mayor contenido de nitrógeno- aparentemente el nitrógeno sirve como un atrayente de las plagas (Scriber 1984).

MANEJANDO LA COMPLEJIDAD

El manejo sostenible del agroecosistema requiere un entendimiento no sólo de cómo los factores individuales afectan a los organismos cultivados, sino también de cómo los factores interaccionan para formar el complejo ambiental. Parte de este entendimiento se obtiene al conocer cómo los factores interaccionan, se compensan, se mejoran y aún contrarrestan, uno con otro. Otra parte viene de conocer el grado de variabilidad presente en la granja, de campo a campo y dentro de cada campo. Las condiciones varían de una estación a otra, así como de un año al siguiente. Desde el clima hasta los suelos, desde factores abióticos hasta los bióticos y desde las plantas hasta los animales, los factores interaccionan varían en patrones dinámicos y siempre cambiantes. Quizás un componente importante de la sostenibilidad es conocer no sólo el grado y la forma de interacción del factor, sino también el rango de variabilidad en interacciones que pueden ocurrir en el tiempo. El mayor reto a retomar en los siguientes capítulos es en cómo adaptar el agroecosistema tanto como sea posible, para aprovechar la complejidad y la variabilidad donde sea apropiado y compensarlas cuando esté fuera de nuestro alcance.

Ideas para Meditar

1. ¿Qué factores pueden haber impactado la salud antes de que el agricultor la compre? ¿Cómo pueden estas influencias afectar el desempeño de la semilla una vez que ésta es plantada?
2. ¿Cuáles son algunas de las maneras en que el agricultor puede manejar un agroecosistema?

un ambiente muy variable, sin tratar de controlar o homogeneizar las condiciones que crean la heterogeneidad?

- 3. ¿Cuáles son algunas de las desventajas para un agricultor que elige enfrentarse o adaptarse (más que vencer) a la heterogeneidad espacial y temporal en el agroecosistema?
- 4. ¿Cuáles son algunas de las maneras en que el agricultor puede compensar exitosamente un factor limitante alterando o manejando uno o varios factores y así contribuir a la sostenibilidad de un sistema agrícola?

Lecturas Recomendadas

Daubenmire, R. F. 1974, *Plants and Environment*. Third Edition. John Wiley & Sons: New York. Este libro estableció los fundamentos para un enfoque

que agroecológico de las relaciones planta-ambiente. Forman, R. T. T., and M. Gordon. 1986. *Landscape Ecology*. John Wiley & Sons: New York.

Lectura esencial en el entendimiento de las relaciones entre la distribución vegetal y la complejidad espacial y temporal del paisaje físico.

Harper, J. L. 1977. *Population Biology of Plants*. Academic Press: London.

Referencia clave para entender los fundamentos de la biología moderna de las poblaciones vegetales, con muchas referencias de sistemas agrícolas.

Schmidt-Nielsen, K. 1990. *Animal Physiology: Adaptations and Environment*. Fourth Edition. Cambridge University Press: New York.

Una revisión importante de la ecología fisiológica de animales en el ambiente.



SECCIÓN III

INTERACCIONES A NIVEL DE SISTEMA

Con las bases autoecológicas estudiadas en la Sección II, estamos en condiciones de expandir nuestra perspectiva a nivel de *Sinecología* – el estudio de las interacciones de grupos de organismos con su ambiente. Esta perspectiva integral enfatiza la necesidad de entender los procesos característicos emergentes de las poblaciones, comunidades y ecosistemas y como esas características pueden usarse en el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles.

Los Capítulos 13 y 14 comienzan a nivel de población. Exploran la ecología de población de varias es-

pecies cultivadas juntas, así como el manejo de los recursos genéticos. El capítulo 15 examina la interacción de especies a nivel de comunidad, explica los beneficios de sistemas complejos y el papel de la cooperación y el mutualismo en la agricultura sostenible. Los capítulos del 16 al 19 exploran un ámbito de conceptos ecológicos importantes que funcionan a nivel de ecosistema. También describen como las características emergentes de sistemas completos son elementos claves para el diseño y manejo de agroecosistemas.

Un cultivo diversificado en Tabasco, México, mostrando una comunidad que incluye yuca, papaya, piña, malanga, plátano y achiote. Estos cultivos interactúan en forma compleja unos con otros, con otros organismos (plagas, microbios, etc.) y con su ambiente físico.



PROCESOS POBLACIONALES EN LA AGRICULTURA: DISPERSIÓN, ESTABLECIMIENTO Y EL NICHU ECOLÓGICO

En la agricultura convencional, el centro de atención son las poblaciones de cultivos o de animales. Mediante el manejo de diferentes factores del complejo ambiental, el productor maximiza la producción de estas poblaciones. Desde el punto de vista de la sostenibilidad del agroecosistema, el enfoque determinista de tratar de cubrir todos los requisitos de una población genéticamente homogénea es inadecuado. El agroecosistema se debe considerar como un conjunto de interacciones entre poblaciones de diferentes organismos, incluyendo cultivos, plantas y animales no cultivados y microorganismos.

La consideración del agroecosistema como un grupo de poblaciones que interactúan requiere diferentes niveles de estudio. En primer lugar, se requieren las herramientas conceptuales necesarias para entender y comparar cómo sobrevive y se reproduce cada población en el ambiente del agroecosistema. Estas herramientas y su aplicación son tema de este capítulo. En segundo lugar, necesitamos considerar las bases genéticas de las poblaciones de cultivos y cómo la manipulación de su potencial genético por el hombre, ha afectado el rango de adaptabilidad y tolerancia de los cultivos. Esto se desarrolla más en detalle en el Capítulo 14. Finalmente, es necesario considerar los procesos a nivel de comunidad y ecosistema que se discuten en los Capítulos 15, 16 y 17.

PRINCIPIOS DE ECOLOGÍA DE POBLACIONES Y DEMOGRAFÍA DE PLANTAS

Los monocultivos han sido el principal sujeto de estudio en la agronomía. El potencial genético de las poblaciones de las plantas cultivadas lo ajustan los fitogenetistas, y los especialistas en producción han desarrollado tecnologías de manejo mediante las cuales se obtiene el máximo potencial de los cultivos. Esto

ha llevado a un tipo de ecólogo agrícola que tiene la capacidad de ajustar sólo un factor del sistema o desarrollar tecnologías que resuelven problemas específicos, como el control de una plaga por medio de algún plaguicida. Sin embargo, el agroecosistema incluye interacciones complejas y dinámicas entre muchas poblaciones de organismos, por lo cual una estrategia agroecológica requiere de análisis amplios e integrales. Los estudios de las interacciones entre poblaciones del mismo nivel y/o de diferentes niveles tróficos deben realizarse simultáneamente. Por ejemplo, el manejo integrado de plagas requiere de análisis simultáneos de la ecología de las poblaciones de cada miembro del complejo cultivo/plaga/enemigo natural; así como también de otras poblaciones de organismos con las que interactúa el complejo en general. Se debe considerar a todo el complejo de interacciones como una comunidad agrícola, un nivel de análisis ecológico se analiza en el Capítulo 15. Primero discutiremos algunos principios básicos de ecología de poblaciones que nos ayudan a entender la dinámica de cada población.

Crecimiento Poblacional

Los ecólogos ven el crecimiento poblacional como el resultado neto de las tasas de natalidad, mortalidad y el movimiento de individuos hacia dentro (inmigración) o hacia fuera (emigración) de una población. El crecimiento poblacional descrito mediante la fórmula:

$$r = (N + I) - (M + E)$$

donde r es la tasa intrínseca de incremento poblacional en el tiempo, considerando la natalidad (N), inmigración (I), mortalidad (M) y la emigración (E). Cualquier cambio en la población a través del tiempo

es descrita por:

$$\frac{dP}{dt} = rP$$

donde P es la población en el tiempo específico (t). Si los recursos no están limitados y las interacciones negativas entre miembros de la población no alcanzan niveles críticos conforme la población incrementa, entonces tendríamos un crecimiento exponencial. Debido a que la ecuación anterior es muy simple, pues no considera efectos de los factores bióticos y abióticos sobre la población y tampoco los límites de crecimiento que el medio impone a la población, se desarrolló la siguiente ecuación:

$$\frac{dP}{dt} = rP \left(\frac{K-P}{K} \right) = rP \left(1 - \frac{P}{K} \right)$$

La tasa de crecimiento poblacional no es afectada por la interferencia cuando P se aproxima a 0 y es baja cuando P se aproxima a K (capacidad de carga del ambiente para la población). Esta ecuación describe una curva sigmoideal o en forma de S, como se muestra en la Figura 13.1. El tamaño máximo de la población se alcanza cuando la curva se "nivela", esto indica que eventualmente se encontrarán problemas para "asignar" recursos a la población en crecimiento. Esta curva se puede aplicar a las especies de arvenses en un campo de cultivo o a algún organismo plaga en un cultivo. La población crece primero lentamente, después acelera su crecimiento hasta alcanzar una tasa de crecimiento máxima para volver después a presentar una tasa de crecimiento lenta conforme incrementa la densidad. Cuando se alcanza la capacidad de carga del ambiente, la curva llega a su máximo nivel y, en muchos casos, empieza a decrecer si el impacto sobre el medio ha creado condiciones que afectan a toda la población.

En los ecosistemas existen mecanismos complejos de retroalimentación que pueden regular el crecimiento poblacional antes de llegar a la capacidad de carga, previniendo a la especie de colapsos de la población. Algunas veces estos mecanismos están directamente determinados por el número de individuos existentes, este tipo de mecanismos son **densodependientes**. Un ejemplo es la competencia por algún recurso limitado. En otros casos, el mecanismo se debe



FIGURA 13.1

Curva de crecimiento poblacional. Esta gráfica muestra el crecimiento teórico de una población en el tiempo. En este caso, la capacidad de carga (K) se alcanza cuando la población llega a un tamaño de 500 individuos.

más a algún factor abiótico cambiante como heladas o inundaciones, por lo que es **densoindependiente**. En sistemas agrícolas, el ser humano ha desarrollado tecnologías que permiten a la población del cultivo incrementar su número o tener una población mayor a la capacidad de carga del ambiente. Usualmente estas intervenciones están asociadas con modificaciones intensivas del hábitat o insumos, incluyendo el control o eliminación de otras especies (tanto plantas como animales) y el uso de fertilizantes y riego.

Colonización de Áreas Nuevas

El estudio del crecimiento de poblaciones nos indica el potencial de una población para incrementar su tamaño en el tiempo. Este debe incluir el potencial de la población para crecer en cierta área, esto es, colonizar nuevos hábitats. El proceso de colonización de áreas nuevas es especialmente importante para los agroecólogos, quienes estudian cómo los organismos, no cultivados, ambos benéficos y perjudiciales, colonizan y se establecen en una parcela agrícola.

Fases de la Colonización

La forma en que una arvense o una plaga animal coloniza un campo de cultivo está relacionada con su ciclo de vida. La invasión inicial se lleva a cabo como

parte de los procesos de dispersión y reproducción de la especie, el establecimiento de la población es dependiente de los requerimientos de las semillas y plántulas o de los huevos y estados juveniles. Si la población permanece en un área o no, depende de la forma de crecimiento, maduración y reproducción. Cada una de estas etapas en la historia de vida de una especie ofrece oportunidades específicas para intervenciones de los productores, ya sea para promover la colonización de una especie deseable o para restringir a una no deseable. El proceso de colonización está dividido en cuatro etapas basados en las fases de colonización de los organismos: dispersión, establecimiento, crecimiento y reproducción. Con el fin de tener mayor claridad estas etapas se discuten principalmente para especies vegetales.

Dispersión. La dispersión de los organismos es un fenómeno importante en los ecosistemas y tiene aplicaciones significativas en la agroecología. La dispersión permite que la progenie se "escape" de la vecindad del organismo madre, disminuyendo así las posibilidades de interferencia intraespecífica entre hermanos. Así como también permite a las especies llegar a nuevos hábitats.

En la agricultura, la dispersión es importante ya que existe una perturbación constante en las parcelas agrícolas. La perturbación, tanto a gran escala como en el caso de la labranza convencional o a pequeña escala, como sucede dentro de los huertos caseros tropicales, continuamente crea nuevos hábitats disponibles para ser colonizados. Aunque muchos organismos mantienen poblaciones residentes en la parcela a pesar de los disturbios y manipulaciones, mucha de la flora y fauna asociada, incluyendo organismos benéficos y perjudiciales, todos llegan a las parcelas por medio de la dispersión. En este contexto, las barreras ecológicas tienen gran relevancia. Las barreras pueden ser tan simples como un borde de arvenses que rodea a la parcela o un borde hecho con diferentes cultivos. En general, un buen entendimiento de los mecanismos de dispersión de los organismos no cultivados y cómo éstos son afectados por las barreras, puede ser útil para el diseño y manejo de los agroecosistemas.

Los mecanismos de dispersión son los que determinan como las plantas y animales se mueven de un lugar a otro durante su ciclo de vida. Estos mecanis-

mos son muy variados, pero frecuentemente dependen de viento, animales, agua o gravedad. La investigación sobre los mecanismos de dispersión de animales y plantas a grandes distancias ha facilitado el entendimiento de cuáles son estos mecanismos y cómo funcionan.

Uno de los mejores trabajos sobre dispersión es el de Sherwin Carlquist (1965) *Vida en una Isla*. Donde revisa la historia natural de las islas del mundo, discutiendo cómo se ha dado la dispersión de los animales y las plantas para llegar a las islas que han tenido alguna conexión física, que están adyacentes a un continente o a islas que no han tenido ninguna de estas relaciones con otras regiones. El trabajo de Van de Pijl (1972) acerca de los principios de dispersión en las plantas superiores explica con mucho detalle la increíble diversidad de mecanismos que ayudan a las semillas a moverse de un lugar a otro. Estos mecanismos favorecen la dispersión de los organismos a distancias cortas o grandes, cruzando barreras increíbles como los desiertos y los océanos. De igual manera estos mecanismos también contribuyen a que una arve se llegue a una parcela nueva.

Un aspecto muy importante en los mecanismos de dispersión es cómo muchos de ellos parecen proveer ventajas selectivas de "alejamiento" de la fuente de reproducción. Esto se ilustra en los estudios de campo realizados sobre la distribución de plántulas alrededor de los árboles madre en los bosques de Costa Rica. Como se muestra en la Figura 13.2, la mayoría de las semillas que germinan y las plántulas se concentran cerca del árbol que los produjo, pero las plántulas más viejas (con potencial de llegar a la etapa adulta, individuos que se pueden reproducir) se encuentran a mayores distancias. Algunos mecanismos no funcionan a distancias mayores. Es interesante considerar el por qué existen ventajas de que las plántulas se establezcan a cierta distancia de los padres, especialmente en relación con la fuente de disponibilidad, competencia potencial y susceptibilidad a la depredación o enfermedades.

Las semillas de las plantas se incorporan al suelo tan pronto como caen, encontrándose la mayoría de ellas en la superficie. La población de cada especie de semillas se combina con otras para formar el **banco de semillas**. En sistemas de cultivo, el análisis de los bancos de semillas del suelo nos puede decir mucho acerca de la historia previa de la parcela y los proble-

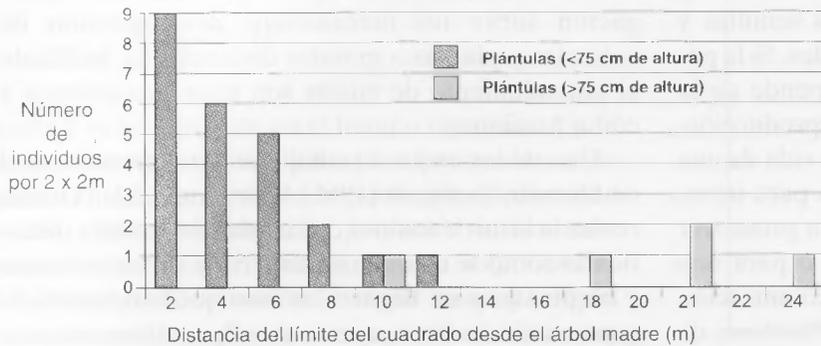


FIGURA 13.2

Distribución de plántulas y juveniles de Gavilan schizolobium en un transecto desde el árbol madre, Rincón de Osa, Costa Rica.

Fuente: Ewert & Gliessman (1972).

mas de arvenses potenciales que pueden surgir; esta información, es muy relevante para diseñar un manejo apropiado.

Ya que la mayoría de los cultivos dependen del ser humano para su dispersión, sus adaptaciones para la dispersión son irrelevantes para la mayoría de ellos. De hecho, muchas de las especies domesticadas han perdido los mecanismos de dispersión que poseían como plantas silvestres. Sus semillas son muy grandes o han perdido los apéndices que facilitaban su dispersión, o sus inflorescencias no expulsan las semillas. La pérdida de las adaptaciones para la dispersión se ve particularmente en los cultivos anuales, cuyas semillas o granos son lo que se cosecha del cultivo.

Establecimiento. Debido a la increíble diversidad de mecanismos de dispersión, en realidad no existe ningún lugar en el planeta al que propágulos de plantas y animales no puedan llegar. Sin embargo, una vez que el propágulo llega a un nuevo sitio, muy probablemente encuentre problemas para su establecimiento, ya que la semilla dispersada no determina donde llegará, son las condiciones del sitio que determinan si se puede establecer o no. Las semillas caen en un ambiente muy heterogéneo y sólo una fracción de los sitios a los que llegan llenan las necesidades de la semilla. Sólo en aquellos micrositos que tienen las condiciones que requieren las semillas - sitios "seguros"- pueden germinar y establecerse. Entre más grande sea el número de semillas de la especie y el

número de sitios seguros, mayor será la probabilidad de que una población de la especie se establezca en el nuevo hábitat.

La fase de plántula es generalmente conocida como el período más sensible del ciclo de vida de una planta; por lo tanto, es la fase crítica en el establecimiento de una nueva población. Esto se da tanto para especies cultivadas como para arvenses y plantas silvestres. Una semilla en latencia puede tolerar condiciones ambientales muy difíciles, pero una vez que germina, la nueva plántula deberá crecer o morir. Cualquiera de las condiciones ambientales extre-

mas que enfrente la plántula la puede matar, incluyendo la sequía, heladas, daño de herbívoros y su cultivo. La intervención humana puede ayudar a asegurar el éxito y la uniformidad del establecimiento de un cultivo, pero la variabilidad del complejo ambiental hace que esta siga siendo la fase más sensible para la población del cultivo. Los estados juveniles tempranos de la mayoría de los animales muestran la misma sensibilidad al estrés ambiental.

Crecimiento y Maduración. Una vez que la plántula se ha establecido su "objetivo" principal será continuar su crecimiento. El ambiente en que se encuentran las plántulas, así como su potencial genético combinados, determinarán la rapidez de su crecimiento, de acuerdo con las mediciones que se han realizado de biomasa acumulada a través del tiempo. Sus tasas de crecimiento son más lentas cuando empieza su madurez, pues se utiliza más energía en el mantenimiento y la producción de órganos reproductivos que en la producción de nuevo tejido. El crecimiento también puede ser más lento debido a que algún factor requerido por la población disminuye y empieza a ser limitante.

El período de tiempo entre la germinación y la maduración puede variar de algunos días para algunas especies anuales, o varias décadas para algunas perennes. Una especie que madura rápidamente colonizará un área nueva en forma distinta a la que madura lentamente y cada una se enfrenta a diferentes "retos" para su manejo.

Reproducción. Una vez que los organismos colonizadores llegan a la madurez se pueden reproducir. Determinará del "éxito" de estos individuos que la nueva población se mantenga en el área, cómo crecerá y cómo afectará a las poblaciones de otras especies. Mediante reproducción vegetativa o sexualmente se producen propágulos. Algunas especies tienen como estrategia un rápido crecimiento y una fuerte interferencia para inhibir a otras especies colonizadoras, seguido esto por una reproducción abundante. Otras especies emplean más recursos para desarrollar pocos individuos, pero dominantes en la población, sacrificando la producción de nuevas semillas en el proceso pero asegurando el éxito para que algunos individuos lleguen a la madurez.

Factores que Afectan el Éxito de la Colonización

En cualquier etapa del proceso de colonización descrito anteriormente, pueden ocurrir algunos eventos o condiciones que eliminan cierto porcentaje de la población. Para una especie vegetal colonizadora, algunos de los individuos son eliminados cuando las semillas no llegan a sitios que permitan su germinación. Otro gran porcentaje de la población se perderá poco después de la germinación, especialmente si las condiciones climáticas no son las ideales. En cualquier momento durante el desarrollo de los individuos juveniles pueden presentarse pérdidas en la población. El resultado final frecuentemente es un número reducido de individuos maduros que pueden reproducirse.

Para algunas especies, particularmente las perennes con ciclos de vida largos, existe gran pérdida de individuos en las primeras etapas de establecimiento que requieren de una secuencia de condiciones ambientales, lo cual ocurre en muy pocos años, para permitir su supervivencia como adultos. Por ejemplo, algunas especies de encino (*Quercus* spp.) en California, se encuentran en agrupaciones de individuos de la misma edad, provenientes de poblaciones de diferentes períodos separados por 40-200 años, indicando que las oportunidades para su establecimiento como nueva población agrupada no ocurren frecuentemente.

Estrategias de Historia de Vida

Cada una de las especies que es exitosa en un ambiente particular tiene una serie de adaptaciones que le permiten mantener una población en ese ambiente en el tiempo. Estas adaptaciones pueden verse como una estrategia del ciclo de vida que asegura la reproducción y continuación de una población viable. En forma general, las historias de vida de las especies se pueden agrupar en dos tipos de estrategias.

A continuación se discuten dos formas de clasificación de las estrategias de historias de vida. Estas nos ayudan a entender cómo poblaciones específicas de organismos son capaces de crecer y colonizar nuevas áreas. De igual forma pueden apoyar en la explicación del papel ecológico de cada especie en un agroecosistema, lo cual es importante en el manejo tanto de los cultivos como de las arvenses.

Teoría de la Selección r y K

Las plantas tienen una cantidad de energía limitada para utilizarla en su mantenimiento, crecimiento y reproducción. El destinar más energía para la reproducción reduce la cantidad de energía disponible para el crecimiento y viceversa. Los ecólogos, después de haber observado las diferencias en la asignación de la energía para el crecimiento o para la reproducción, han desarrollado un sistema de clasificación que define dos tipos básicos de estrategias de historias de vida, que son como los extremos de un continuo: selección- r y selección- K . Este sistema es conocido como la teoría de la selección r y K (MacArthur 1962, Pianka 1970, 1978).

En un extremo, se encuentran las especies que viven en ambientes hostiles en los cuales la mortalidad es determinada principalmente por los factores ambientales limitantes y no por la densidad de la población y donde la selección natural favorece a los genotipos con un valor intrínseco de crecimiento alto. Los organismos de las poblaciones de estas especies emplean más energía para la reproducción y menos para el crecimiento y mantenimiento, una vez que se establecen. Los organismos que siguen esta estrategia se les denomina **estrategas r** , ya que los factores ambientales mantienen el crecimiento de estas poblaciones en el punto de incre-

mento más rápido de la curva logística (Figura 13.1). El tamaño de sus poblaciones está limitado más por factores físicos que por factores bióticos.

En el otro extremo encontramos las especies que viven en ambientes estables y predecibles, donde la mortalidad es dependiente de la densidad, como la interferencia con individuos de otras poblaciones, y donde la selección natural favorece a los genotipos con la habilidad de tolerar o evadir la interferencia. Estos organismos asignan más recursos al crecimiento vegetativo y a estas especies se les llama **estrategas K**, porque mantienen sus poblaciones más densas cuando el ta-

maño de la población está cerca de la capacidad de carga (K) del ambiente. El tamaño de sus poblaciones está controlado principalmente por factores bióticos.

En general, los *estrategas r* son oportunistas, tienen la habilidad de colonizar hábitats perturbados donde la interferencia es mínima, pueden aprovechar rápidamente los recursos cuando están disponibles y usualmente son de ciclos de vida cortos, asignan gran parte de la energía y biomasa a la reproducción y pueden ocupar hábitats perturbados o en sus primeras etapas sucesionales. Los animales que son *estrategas r* requieren poco cuidado de los padres cuando

TEMA ESPECIAL

El Desarrollo de un Cultivo Perenne de Granos

La base de la dieta de los norteamericanos son granos como: trigo, maíz y arroz; los que son considerados *estrategas r*. Estas son especies anuales que crecen rápidamente en ambientes perturbados como son los campos de cultivo y utilizan gran parte de su energía para producir estructuras reproductivas. A través del proceso de domesticación, el ser humano ha favorecido la *estrategia r* de estas especies, creando variedades altamente productivas pero dependientes de insumos externos y de la intervención humana.

Los investigadores del Land Institute están preocupados por la degradación del suelo debido a la labranza frecuente y a la utilización de plaguicidas y fertilizantes sintéticos necesarios para la producción de los granos básicos. En este instituto trabajan en el cruce con granos perennes como una solución al problema de los altos insumos (Eisenberg 1989, Piper 1994).

Desafortunadamente, desarrollar una variedad de cereal perenne que tenga altos rendimientos no es fácil. Existen algunas especies perennes que producen semillas ricas en carbohidratos, el problema es que al ser *estrategas K* asignan una proporción de energía muy pequeña para la producción de semillas. Por ejemplo, algunos parientes perennes de los cultivos de granos son pastos silvestres que tienen rizomas grandes en los que almacenan reser-

vas alimenticias. El rizoma ayuda a sobrevivir a la planta durante crudos inviernos y sequías ocasionales y facilita la reproducción asexual. Para estas plantas, la producción de semillas no tiene mucha prioridad.

Los investigadores del Land Institute están intentando cruzar nuevos cultivos de granos que mantengan el rizoma y que al mismo tiempo produzcan suficiente semilla para cosechar. Habría muchos beneficios ecológicos si se pudieran sembrar plantas con las características descritas. El suelo no tendría que ser labrado cada estación, y los sistemas radicales de estas plantas prevenirían la erosión. Las plantas perennes serían más resistentes, reduciendo la necesidad de plaguicidas y fertilizantes cada año.

Los investigadores han evaluado originalmente más de 4 000 especies perennes, para conocer su potencial para producir granos y han enfocado su investigación en los candidatos más promisorios. Estos incluyen a un pasto (*Tripsacum dactyloides*) y cruces entre el sorgo común y el zacate Johnson (*Sorghum halepense*). Otros candidatos que no son gramíneas son el girasol (*Helianthus maximiliani*) y el bundle flower de Illinois (*Deromanthus illinoensis*).

A pesar de que el programa de cruces sea exitoso, la utilización de los nuevos cultivos dependerá de cambios en la forma de pensar de los productores y consumidores. Los consumidores deben estar abiertos a la posibilidad de consumir el pasto *Tripsacum dactyloides* y las plantaciones de cereales tendrían que ser rediseñadas para aprovechar las ventajas de una cubierta permanente.

son jóvenes; mientras que en las plantas, los estrategas *r* generalmente producen un gran número de semillas que se dispersan fácilmente. En contraste, los estrategas *K* son tolerantes, usualmente tienen ciclos de vida largos, con una etapa vegetativa prolongada y asignan pequeñas cantidades de biomasa total a la reproducción, aparecen en los ecosistemas en las etapas tardías de la sucesión. Los animales con estrategia *K* cuidan a sus crías, mientras que las plantas producen relativamente pocas semillas que contienen una cantidad significativa de reservas.

Las categorías de selección-*r* y selección-*K* no se definen claramente, son los extremos de un continuo en los que se encuentran pocas especies. La mayoría de los organismos muestran estrategias de vida combinadas entre selección-*r* y selección-*K*. Por lo que hay que ser muy cautelosos cuando se aplica la teoría de la selección *r* o *K* en la dinámica y desarrollo de las poblaciones.

Sin embargo, los conceptos de selección *r* y *K* pueden ser muy útiles para el entendimiento de la dinámica de las poblaciones en los agroecosistemas. La mayoría de los organismos colonizadores, especialmente las arvenses, patógenos e insectos plaga son *r*. Estas especies son oportunistas, se dispersan fácilmente, los organismos alcanzan su madurez rápidamente, ocupan y dominan hábitats perturbados en el paisaje agrícola. Es interesante considerar que la mayoría de los cultivos básicos de los que depende la humanidad son especies clasificadas como *r*. La mayor porción de la biomasa se encuentra en la parte reproductiva. Esto es especialmente cierto para los granos básicos que consumimos. Se cree que estos cultivos derivan de especies que evolucionaron para establecerse en hábitats perturbados, su habilidad como especies *r* para crecer rápidamente es la que las hizo buenas candidatas para la domesticación.

Una razón por la que especies de arvenses *r* sean un problema en los sistemas agrícolas es que los cultivos también son *r* y las condiciones de perturbación requeridas por los cultivos son las mismas en las que las arvenses crecen bien. Los sistemas agrícolas anuales o los sistemas perennes con perturbaciones frecuentes, favorecen el crecimiento de especies que los productores tratan de evitar o eliminar con diversas tecnologías. Desde esta perspectiva, se puede observar que las estrategias *K* quizás juegan un papel im-

portante como especies cultivadas. Los sistemas de cultivo que incluyen plantas perennes agregan un valor extra en la salud y desarrollo de los cultivos, aún en los casos en el que la fruta se cosecha. Mientras menos perturbaciones se ocasionen habrá menor oportunidad de que se establezcan especies que son estrategas *r* como las arvenses.

Una propuesta interesante es combinar las fortalezas y ventajas de ambas estrategias con una sola población de cultivo. Las especies oportunistas de rápido crecimiento, con alto esfuerzo reproductivo que son las *r*, se pueden combinar con las especies que acumulan biomasa y son menos tolerantes al estrés, las estrategias *K*. Un ejemplo de lo descrito anteriormente se discute en el tema especial que se describe a continuación. En capítulos posteriores se presentan los conceptos de diversidad y sucesión, adicionalmente se dará más atención al uso de estrategias *K* en los agroecosistemas.

Teoría de la Intensidad Estrés/Perturbación

Como una alternativa a la teoría de la selección *r-K*, los ecólogos han desarrollado un sistema de clasificación de acuerdo con la biografía de las especies con tres categorías en lugar de dos. Se basa en que existen dos factores básicos: estrés y perturbación, que limitan la producción de biomasa en una planta en un ambiente determinado. El estrés ocurre cuando las condiciones ambientales son las que limitan la producción, tales como sombra, sequía, deficiencias y bajas temperaturas. Las perturbaciones ocurren cuando existe una eliminación parcial o total de la biomasa vegetal debido a eventos naturales tales como pastoreo de animales salvajes, fuego o actividades humanas como trillado y labranza. Cuando se describen los hábitats usando ambas dimensiones y considerando niveles opuestos (estrés o perturbación alta y baja) se generan cuatro tipos de escenarios. Cada uno de los hábitats se asocia con una estrategia de historia de vida particular (Cuadro 13.1). Este esquema quizás tenga una aplicación más directa que el de la teoría de selección *r-K* y se puede aplicar en el manejo de las arvenses.

En un ambiente donde la perturbación y el estrés son altos, no existe mucho crecimiento y las plantas se pueden clasificar en tres tipos:

CUADRO 13.1 Estrategias de historia de vida basada en los niveles de estrés y perturbación a diferentes niveles en el ambiente.

	Alto estrés	Bajo estrés
Perturbación alta	(Mortalidad)	Ruderales (R)
Perturbación ligera	Tolerantes (S)	Competidores (C)

Adaptado de Grime (1977).

- **ruderales (R)** las especies que se adaptan a condiciones de alta perturbación y bajo estrés.
- **tolerantes (S)** las especies que viven en ambiente de alto estrés y baja perturbación
- **competidores (C)** las especies que viven en condiciones de bajo estrés y bajas perturbaciones y poseen buenas habilidades competitivas.

Los sistemas agrícolas anuales presentan condiciones de perturbaciones frecuentes debido a la frecuencia de las cosechas, pero de relativamente bajo estrés pues se tratan de optimizar las condiciones para que el cultivo anual crezca. Las ruderales se ven muy favorecidas en estas condiciones, pues presentan ciertas características que les permiten colonizar estos ambientes tales como: ciclo de vida corto, gran producción de semilla y habilidad para colonizar ambientes recién abiertos. La mayoría de las plantas de la categoría de ruderales, como las arvenses, son estrategias *r*.

Los agroecosistemas degradados como la agricultura en laderas erosionadas y humedales, o sistemas de producción de cereales de temporal en regiones que presentan sequías periódicas y erosión por viento, favorecen el crecimiento de las plantas tolerantes al estrés. Las especies no cultivadas que toleran estas condiciones pueden ser las dominantes del paisaje en estos hábitats; un ejemplo en los humedales tropicales del sureste de Asia son las gramíneas del género *Imperata* en el trópico húmedo y *Bromus tectorum* en los pastizales del Gran Cañón en Estados Unidos. Debido a que las especies tolerantes al estrés han sido seleccionadas para permanecer en ambientes estresantes característicos de ambientes alterados y degradados, éstas pueden establecer y mantener su dominancia a pesar de que el ambiente donde se encuentran sea relativamente poco productivo.

En muchos ecosistemas, al igual que los sistemas de cultivo de especies perennes, encontramos a los competidores. Estas plantas han desarrollado características que les permiten maximizar la captura de recursos

bajo condiciones de poca perturbación, pero no toleran que se remueva su biomasa en forma considerable. Perturbaciones excesivas a través de la cosecha de su biomasa daría oportunidad a la invasión de arvenses, mientras que el incremento en la intensidad del estrés, tal como la extracción excesiva de nutrientes del suelo o agua, permitiría el establecimiento de organismos tolerantes. Cuando se corta un bosque y el ecosistema del suelo se deja intacto, la recolonización por especies tolerantes al estrés en las primeras etapas de la sucesión es común, pero los árboles usualmente se reestablecen, crecen y vuelven a ser dominantes. Sin embargo, si existen incendios periódicamente en los que se quema el material vegetal, la intensidad de la perturbación permite la invasión y dominancia de especies de ciclo de vida corto y ruderales agresivas que retardan mucho la recuperación de las especies forestales.

Ambas teorías, la de la selección *r* y *K* y la de intensidad estrés/perturbación, proveen bases para entender la dinámica de las poblaciones de organismos en relación con su ambiente. El entendimiento de estas teorías en relación con las plantas tanto cultivadas como no cultivadas en un agroecosistema, deben ser consideradas en la planeación, establecimiento y desarrollo del sistema.

NICHO ECOLÓGICO

El concepto de historia de vida nos ayuda a entender el papel de una población en el ecosistema y cómo se mantiene en el tiempo. Un marco conceptual adicional es necesario para el entendimiento del papel y lugar de las especies. Este es el concepto de **nicho ecológico**.

El nicho ecológico de un organismo se define como la función y el sitio en el ambiente. El nicho comprende la localidad física del organismo en el medio, sus relaciones tróficas, sus limitantes y tolerancias a las condiciones ambientales y sus interacciones con otros organismos. El concepto de nicho ecológico establece un fundamento importante para determinar el impacto potencial que una planta puede tener en el ambiente y en los otros organismos que se encuentran allí. Esto puede ser de gran valor en el manejo de interacciones complejas entre poblaciones en un agroecosistema.

Conceptualizaciones de Nicho

El concepto de nicho lo propusieron Grinnell (1924, 1928) y Elton (1927) como el lugar de un animal en el medio. Por "lugar", querían decir la máxima distribución posible de la especie, controlado únicamente por sus límites estructurales e instintos. Actualmente, esta es la definición de **nicho potencial**. El nicho potencial contrasta con el **nicho realizado**, que es el área que una especie puede ocupar y está determinada por sus interacciones con otros organismos en el ambiente (esto es por los impactos de la interferencia, positiva o negativa).

Ambos, el nicho potencial y el real, conceptualizan al nicho con dos facetas diferentes, una es la del hábitat en el que el organismo está y la otra es la función del organismo en el hábitat. La segunda la podemos entender como la "profesión", la forma en que vive en el hábitat. La función de un animal, por ejemplo, puede ser alimentarse de flores, hojas o insectos. Un microorganismo puede ser descomponedor o parásito. Muchos niveles de interacción se utilizan para definir lo que es el nicho de una especie.

Una contribución importante para el concepto de nicho fue hecha por Gause (1934), quien desarrolló la teoría conocida como la Ley de Gause: dos organismos no pueden utilizar el mismo nicho ecológico en el mismo hábitat, si existen recursos limitados, eventualmente un organismo excluye al otro, mediante la exclusión competitiva. La exclusión competitiva no siempre es la causa de que dos poblaciones con nichos similares no se encuentren juntas. Existen otros mecanismos que probablemente pueden ocurrir.

La idea de que el nicho es la "profesión" de un organismo, frecuentemente no es adecuada. Para desarrollar un mejor conocimiento acerca del nicho, los ecólogos se han enfocado a definir en forma separada las dimensiones que lo conforman. Un grupo de curvas factor-respuesta (discutidas en el Capítulo 3) determinan las necesidades para un organismo particular. Estas curvas se van sobreponiendo para formar una matriz de respuesta a los diferentes factores. En una matriz simple de dos factores, el área delineada por las regiones de tolerancia que se traslapan puede verse como un área, en dos dimensiones, del recurso usado por el organismo. Si agregamos más curvas factor-respuesta, estos espacios son de forma multidimensional.

Este procedimiento es la base para la conceptualización de nicho como un hipervolumen multidimen-

sional que un organismo puede ocupar potencialmente (Hutchinson 1957). Si se incluyen las interacciones bióticas en esta matriz, el hipervolumen que se forma por el traslape de las curvas factor/respuesta permiten definir el nicho actualmente ocupado por este organismo.

Amplitud del Nicho

Si pensamos en el nicho como un espacio multidimensional, podemos visualizar que el tamaño y forma de este espacio es diferente para cada especie. La medida de una o de más de una de sus dimensiones se denomina **extensión de nicho** o **amplitud de nicho** (Levins 1968, Colwell & Futuyma 1971, Bazzaz 1975). Los organismos con un nicho muy estrecho, con adaptaciones y actividades para un hábitat especial, se les llama especialistas. Aquellos con un nicho amplio se les conoce como generalistas. Los generalistas se adaptan más que los especialistas, se pueden ajustar rápidamente a cambios ambientales y utilizan un rango amplio de recursos. Los especialistas, son mucho más específicos en su distribución y actividades y usan un rango de recursos más estrecho. Los especialistas son muy específicos en su distribución y actividades, pero tienen la ventaja de realizar un mejor uso de un recurso abundante si está disponible. En algunos casos, ya que un generalista no utiliza completamente los recursos en un hábitat, deja espacios en el nicho para los especialistas. En otras palabras, pueden existir varios nichos de especialistas en un nicho de un generalista.

Diversidad y Traslape del Nicho

Los ecosistemas naturales se caracterizan por un rango amplio de biodiversidad. En estos sistemas muchas especies diferentes ocupan lo que aparentan ser nichos ecológicos similares. Si aceptamos la Ley de Gause, que dice que dos especies no pueden ocupar el mismo nicho al mismo tiempo sin que se excluyan, entonces se concluye que los nichos de organismos similares son diferentes, o que existe algún mecanismo que permite que la existencia ocurra. La exclusión competitiva parece ser un fenómeno relativamente poco común. También en los sistemas agrícolas los organismos ecológicamente similares ocupan simultáneamente lo que parece ser el mismo nicho.

En realidad los productores han aprendido, por la experiencia y constante observación de sus campos, que frecuentemente existen ventajas si se manejan mezclas de cultivos y organismos no cultivados en un agroecosistema, aún cuando muchos de los componentes de la mezcla tengan requerimientos similares. La exclusión competitiva rara vez ocurre; por lo que debe haber un cierto grado de coexistencia o evasión de la competencia. Esta coexistencia de organismos, aparentemente similares, tanto en ecosistemas como en agroecosistemas se hace posible por algún tipo de divergencia ecológica entre las especies involucradas. Esta divergencia se denomina **diversidad del nicho** o diversificación de nicho. Algunos ejemplos se describen a continuación:

- Plantas con diferente profundidad de raíz. La variabilidad en la arquitectura de los cultivos, bajo el suelo, permite a diferentes especies evitar la interferencia directa por nutrimentos o agua, cuando utilizan componentes muy semejantes en la parte aérea.
- Plantas con diferentes metabolismo fotosintético. Cuando un cultivo usa la ruta fotosintética C4 y otro usa el C3, ambos cultivos pueden coexistir. Una especie requiere de exposición completa a la radiación solar, mientras que la otra tolera ambientes con menor intensidad de luz creados por otra especie. El policultivo tradicional maíz/frijol de Mesoamérica es un ejemplo bien conocido.
- Insectos con diferente preferencia de presa. Dos insectos parásitos similares pueden coexistir en un sistema agrícola, pero cada uno parasita a diferente hospedante. La especificidad entre el hospedante y el parásito puede ser una forma de diversificación de nicho, que permite la coexistencia de insectos adultos en cualquier lugar del agroecosistema.
- Aves con conductas diferentes de anidación o alimentación. Algunas aves depredadoras pueden consumir presas similares en un agroecosistema, pero si tienen sitios y hábitats de anidación diferentes, o si se alimentan a diferentes horas del día, pueden coexistir en el sistema agrícola y ayudar en el control de organismos plaga. Un buen ejemplo de lo anterior son los búhos y gavilanes.
- Plantas con necesidades nutritivas diferentes. Las poblaciones mixtas de arvenses coexisten en el

mismo hábitat, debido en parte, a sus necesidades diferenciales de nutrimentos que quizás han evolucionado como resultado de una ventaja competitiva de evitar la exclusión competitiva. La población de un cultivo quizás tenga menos interferencia negativa de una población mixta de arvenses que de una población de una arvense dominante con características similares al nicho del cultivo.

Aparentemente la selección natural actúa a favor de la diferenciación de nichos, por vía de la separación de alguna porción del nicho entre poblaciones. La diferenciación del nicho permite un traslape parcial de los nichos sin que se presente exclusión.

El concepto de nicho, combinado con el conocimiento de los nichos de las especies tanto cultivadas como no cultivadas, pueden proveer una herramienta importante para el manejo de un agroecosistema. Un productor puede aprovechar el traslape de nichos para excluir a una especie que no se desee en el agroecosistema; también puede utilizar la diferenciación de nichos para combinar especies que beneficien al agroecosistema.

APLICACIONES DE LA TEORÍA DEL NICHOS EN LA AGRICULTURA

Los agricultores están manejando constantemente aspectos de nichos ecológicos de los organismos involucrados en el sistema agrícola, aunque la mayoría de ellos nunca se refiere directamente al concepto. Sin embargo, una vez que este concepto es entendido como una herramienta útil del manejo del ecosistema, puede ser aplicado en una variedad de formas, desde asegurar el rendimiento máximo mediante un entendimiento del nicho de un cultivo principal, hasta determinar si una especie no cultivada puede causar interferencia negativa con el cultivo. Algunos ejemplos específicos son los siguientes:

Promoción o Inhibición del Establecimiento de Especies de Arvenses

Cualquier parte de la superficie del suelo no ocupada por la población del cultivo está sujeta a la invasión por especies no cultivadas de arvenses. Estas están especializadas para ser exitosas en lo que puede ser de-



FIGURA 13.3

Distintas arquitecturas de raíz permiten el traslape de nicho. El sistema superficial de la raíz de la brócoli trasplantada (izquierda) y el sistema más profundo de la raíz principal de la mostaza silvestre, plantada mediante siembra directa (derecha) utilizan recursos de diferentes partes del perfil de suelo. Esto permite que las plantas ocupen el mismo hábitat sin interferencia negativa.

nominado como ambientes productivos (ejemplo, campos agrícolas), ocupan un nicho que favorece las poblaciones de hierbas anuales con estrategia de selección *r* o ruderales. En sistemas de cultivo con menor perturbación, donde la biomasa vegetal total está sometida a menor interrupción o remoción, las arvenses bianuales o perennes competitivas (pero todavía seleccionadas-*r*) llegan a ser comunes. En un sentido, la capacidad de colonización es una característica relativamente especializada del nicho.

La faceta de hábitat del concepto de nicho puede ser usada para ayudar a guiar cómo se manipulan las

condiciones ambientales de un campo agrícola, para promover o inhibir el establecimiento de especies de arvenses. El tipo de modificación dependerá de la especificidad del nicho de cada especie con relación al cultivo. Con el conocimiento de las características del nicho de una especie de arvense, podemos empezar por controlar las condiciones de los "sitios seguros" para volverlos poco ventajosos para la arvense. Adicionalmente, podemos buscar alguna fase crítica o susceptible en el ciclo de vida de la población de la arvense, en la cual una práctica de manejo particular podría eliminar o reducir la población. También podría promoverse el crecimiento de una población de arvenses que inhiban otras arvenses. Por ejemplo, la mostaza silvestre (*Brassica* spp.) tiene poco efecto negativo en cultivos, pero tiene la habilidad de desplazar mediante interferencia otras arvenses que pueden tener influencia negativa en el cultivo. Una discusión más detallada de este fenómeno se ofrece en el estudio de caso más adelante.

Es importante recordar que la mayoría de las arvenses son colonizadoras o invasoras, y que los campos de cultivo que son perturbados anualmente, son precisamente el tipo de hábitats para los cuales han sido seleccionadas. El reto es encontrar una manera de incorporar estos conceptos ecológicos dentro del plan de manejo, donde las actividades planeadas, tal como las escardas, cultivos y deshierbas, están programadas o controladas de tal manera que el nicho favorable para la colonización de arvenses pueda ser ocupado por especies deseables.

Control Biológico de Insectos Plaga

El control biológico clásico es un ejemplo excelente del uso del concepto de nicho. Un organismo benéfico es introducido dentro de un agroecosistema con el propósito de hacerlo ocupar un nicho vacío. Por lo general, una especie depredadora o parásita es introducida en un sistema de cultivo en el cual estaba ausente, para ejercer presión negativa sobre la población de una presa u hospedante que ha sido capaz de alcanzar niveles suficientes para convertirse en plaga o enfermedad, debido a la ausencia de un organismo benéfico.

Es de esperarse que una vez que el organismo benéfico es introducido dentro del sistema de cultivo, este será capaz de completar su ciclo de vida y repro-

ducirse en cantidad suficiente para llegar a ser un residente permanente del agroecosistema. Pero frecuentemente, las condiciones del nicho en el cual la especie benéfica es introducida no reúne los requerimientos para su sobrevivencia y reproducción a largo plazo, llegando a ser necesaria una reintroducción. Esto sucede especialmente en un ambiente agrícola constantemente cambiante, con alta perturbación y

alteración periódica de las características del nicho necesarias para mantener poblaciones permanentes, tanto de plagas como de organismos benéficos.

Otro uso potencial del nicho en control biológico es la introducción de otro organismo que tiene un nicho muy similar al de la plaga, pero el cual tiene un impacto menos negativo sobre el cultivo. El herbívoro introducido, por ejemplo, puede alimentarse de

ESTUDIO DE CASO

Cultivo Intercalado de Brócoli y Lechuga

Un policultivo es exitoso cuando son minimizadas las potenciales interferencias competitivas entre las especies de cultivo que lo componen. Esto se logra mezclando plantas con patrones complementarios de uso de recursos o estrategias de historia de vida complementarias.

Dos cultivos que han demostrado que pueden combinarse en un policultivo son la brócoli y la lechuga. Estudios realizados en la granja experimental de la Universidad de California, Santa Cruz (Aoki *et al.* 1989) han demostrado que la mezcla de estos cultivos produciría un rendimiento más alto que un monocultivo de lechuga y que uno de brócoli cultivados en la misma área de tierra. (Este resultado llamado sobre-rendimiento se explica con mayor detalle en el Capítulo 16.)

En dichos estudios, la brócoli y la lechuga fueron plantadas juntas en tres densidades diferentes y los rendimientos de cada uno se compararon con los rendimientos en monocultivo de cada una de ellas. La densidad más baja de policultivo fue una sustitución del cultivo asociado, en el cual la densidad de plantación total fue similar a la de un monocultivo estándar. El policultivo con la densidad más alta fue el de un policultivo agregado, en el cual las plantas de brócoli fueron intercaladas entre las plantas de lechuga plantadas a una densidad estándar. Los monocultivos fueron plantados a densidades comerciales estándares, los cuales están diseñados para evitar la competencia interespecífica.

Cada una de las tres densidades de policultivo produjeron rendimientos totales más altos que los

monocultivos. Las diferencias de rendimiento variaron desde 10 % hasta 35 % (mayor para el policultivo en sustitución). El policultivo en agregado produjo cabezas de lechuga de un peso promedio ligeramente más bajo que la lechuga en monocultivo, pero la producción combinada excedió el total producido por una combinación de monocultivos en la misma superficie de tierra. Los policultivos también retuvieron más humedad del suelo que los monocultivos, indicando que el arreglo físico de las dos especies en el campo ayuda a conservar este recurso.

Estos resultados indican que la interferencia competitiva interespecífica no impactó negativamente las plantas en los policultivos, aún cuando la densidad fue aproximadamente el doble que la de cualquiera de los monocultivos. Para que se lograra evadir la competencia, tanto la brócoli como la lechuga deben haber sido capaces de utilizar los recursos que no estaban accesibles para la otra especie.

La revisión de la historia de vida y los nichos de las dos especies esclarece la complementariedad de sus patrones de uso de recursos y sugiere mecanismos para los sobre-rendimientos observados. La lechuga madura rápidamente completando casi todo su crecimiento en los 45 días después de ser trasplantada en el campo. Esta también tiene un sistema radical relativamente superficial. La brócoli madura mucho más lentamente y sus raíces penetran mucho más profundo en el suelo. Es por ello que cuando las dos especies son plantadas casi simultáneamente, la lechuga recibe todos los recursos que ésta necesita para completar su crecimiento antes que la brócoli se haga muy grande; entonces después de que la lechuga es cosechada, la brócoli puede tomar ventaja total de los recursos disponibles hasta llegar a su madurez.

una parte de la planta que no es significativa económicamente. Si el herbívoro introducido tiene un nicho lo suficientemente similar a la plaga que se debe controlar, este puede ser capaz de desplazarla. Pueden encontrarse aplicaciones similares a las descritas anteriormente para arvenses.

Diseño de Sistemas de Policultivo

Cuando dos o más poblaciones de cultivo diferentes son plantadas juntas para formar un agroecosistema de cultivos intercalados, y los rendimientos de las poblaciones combinadas son mayores que las de los cultivos plantados en forma separada, es muy probable que el incremento en el rendimiento sea el resultado de la complementariedad de las características del nicho de las poblaciones de cada miembro. Para que los sistemas de policultivo sean exitosos, cada especie debe tener un nicho en alguna forma diferente. Por lo tanto, es esencial el conocimiento completo de las características del nicho de cada especie. En algunos casos de sistemas de cultivos cada especie en el sistema ocupa un nicho que no está relacionado o que está desocupado en el sistema, logrando una complementariedad de nicho. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los nichos de las especies involucradas se traslapan, pero la interferencia al nivel interespecífico es menos intensa que la interferencia al nivel intraespecífico.

Entonces, el manejo exitoso de mezclas de cultivos, depende del conocimiento de la dinámica de cada población que las componen, así como de las características específicas de sus nichos. Este conocimiento entonces forma la base para el manejo del policultivo como una comunidad de poblaciones, un nivel de manejo agroecológico en el cual nos enfocaremos en el Capítulo 15.

ECOLOGÍA DE POBLACIONES: UNA PERSPECTIVA DE CULTIVO

En este Capítulo el enfoque ha sido sobre poblaciones en el contexto de su ambiente. Se han discutido las semejanzas y diferencias importantes entre poblaciones de cultivo, plantas no cultivadas y especies naturales. Algunas de estas características, junto a otras de relevancia se resumen en el Cuadro 13.2.

El conocimiento de estas características es especialmente importante cuando estamos tratando de

encontrar estrategias de manejo con base en la ecología de especies de arvenses. Las especies de arvenses mantienen algunas de las características de las poblaciones de ecosistemas naturales y silvestres (ejemplo, capacidad de dispersión, capacidad de fuerte interferencia intra e interespecífica, latencia), pero mediante una gama de adaptaciones (ejemplo, alta viabilidad de las semillas, estructura poblacional heterogénea en edades, alta tasa de reproducción, diversidad genética más estrecha) se han adaptado a las condiciones de perturbación y alteración del ambiente típico de los agroecosistemas, especialmente de aquellos sistemas que dependen de cultivos anuales. La capacidad de las arvenses para vivir en agroecosistemas impone fuertes retos para quien maneja el agroecosistema.

Cada especie tiene ciertas estrategias para asegurar que los individuos de esa especie completen exitosamente su ciclo de vida, permitiendo así a sus poblaciones mantener una presencia en un cierto hábitat durante el tiempo. Los principios de ecología de poblaciones aplicados agroecológicamente ayudan al agricultor a decidir dónde y cómo obtener ventaja de la estrategia particular de la historia de vida de cada especie, ya sea para promover o limitar el crecimiento de la población de la especie, dependiendo de su papel en el agroecosistema. Aquellos que manejan los agroecosistemas y los investigadores de este tema necesitan establecer conceptos en ecología de poblaciones tales como el sitio seguro, estrategias r y k y nicho ecológico, para desarrollar más técnicas y principios para el manejo eficaz y sostenible de organismos cultivados y no cultivados.

Ideas para Meditar

1. ¿Qué podría permitir la coexistencia de dos cultivos muy similares, que generalmente se supondría que se excluyen al competir entre sí y que crezcan en el mismo espacio de recursos?
2. ¿Cómo podría usarse el concepto de diversidad de nicho para diseñar una estrategia alternativa de manejo de una plaga herbívora en un sistema de cultivo?
3. Identifique varias etapas, particularmente sensibles, en el ciclo de vida de una especie de una arvense, y describa cómo este conocimiento puede ser valioso para el manejo de poblaciones de la arvense en forma sostenible.

CUADRO 13.2 Características de la población de cultivos, plantas no cultivadas y especies naturales

	Población de cultivo	Población de plantas no cultivadas	Población natural
<i>Dispersión</i>	Poca o ninguna	Muy importante	Importante
<i>Inmigración</i>	Propágulo entrante sin unir al producido	Inmigración muy importante	La mayoría de los propágu- los de poblaciones locales
<i>Viabilidad de la semilla</i>	Alta	Alta	Variable
<i>Lluvia de semillas</i>	Controlada	Relativamente homogénea	En parches
<i>Ambiente del suelo</i>	Homogéneo	Homogéneo	Heterogéneo
<i>Dormancia de la semilla</i>	Ninguna, la semilla no es parte del banco de semillas	Variable, presente en el ban- co de semillas	Común; semilla presente en el banco de semillas
<i>Relaciones de edad</i>	Frecuentemente con edades si- milares, sincrónica	Mayormente con edades si- milares, sincrónica	Variable en edades, mayor- mente asincrónica
<i>Interferencia intraespecífica</i>	Reducida	Puede ser intensa	Puede ser intensa
<i>Densidad de la semilla</i>	Baja y controlada	Usualmente bastante alta	Variable
<i>Mortalidad dependiente de la densidad</i>	Poca o ninguna	Significativa	Significativa
<i>Interferencia interespecífica</i>	Reducida	Muy importante	Importante
<i>Tasa reproductiva</i>	Muy alta	Muy alta	Baja
<i>Diversidad genética</i>	Generalmente muy uniforme	Relativamente uniforme	Generalmente diversa
<i>Estrategias de historia de vida</i>	Estrategas r modificados	Estrategas r, C y R	Estrategias K y S

Adaptado de Weiner (1990).

- ¿Qué aspecto de demografía vegetal ha sido usado con éxito por los agrónomos en su búsqueda por lograr mejores rendimientos de los cultivos, pero el cual haya sacrificado la sostenibilidad total del agroecosistema?
- ¿Cuál es su definición de una arvense "buena"?
- Los ambientes tropicales parecen tener más especialistas, mientras que los ambientes templados tienen más generalistas. ¿En dónde están los agroecosistemas dentro de este espectro?

Lecturas Recomendadas

Grime, J. R. 1979. *Plant Strategies and Vegetative Processes*. J Wiley and Sons: New York.

Una revisión de la relevancia del concepto de estrategia vegetal en la teoría ecológica y evolutiva.

Harper, J. L. 1977. *Population Biology of Plants*. Academic Press: London.

Es considerado como la obra clave en la biología moderna de poblaciones vegetales, este libro analiza de-

talladamente la demografía vegetal y las estrategias de historia de vida.

Radosevich, S. R. and J. S. Holt. 1984. *Weed Ecology: Implications for Vegetation Management*. John Wiley and Sons: New York.

Una revisión completa de cómo el conocimiento ecológico de arvenses y poblaciones de arvenses forma una base esencial para su manejo exitoso.

Silvertown, J. W. 1987. *Introduction to Plant Population Ecology*. Second Edition. Longman: London.

Una introducción actualizada al campo de la ecología de poblaciones vegetales, con muchas referencias sobre estudios de poblaciones agrícolas.

Van der Pijl, L. 1972. *Principles of Dispersal in Higher Plants*. Second Edition. Springer-Verlag: Berlin.

Una revisión de la ecología de los mecanismos de dispersión en plantas y su papel en la determinación del éxito de diferentes especies vegetales en el ambiente.

RECURSOS GENÉTICOS EN AGROECOSISTEMAS

La agricultura se inició tan pronto como las diversas culturas intensificaron el uso y cuidado de algunas plantas y animales que consideraron de valor. Durante este proceso los humanos sin advertirlo seleccionaron características y cualidades específicas de estos organismos útiles, alterando en el transcurso del tiempo sus características genéticas. Su habilidad para producir biomasa se maximizó, pero su habilidad para sobrevivir sin la influencia humana se redujo. El humano se volvió dependiente de estas especies domesticadas para la obtención de alimentos y fibras, alimentación de sus animales, la mayoría de ellas se volvieron dependientes de nosotros.

A través de la historia humana, se ha manipulado la constitución genética de los cultivos sin tener un conocimiento explícito de la genética de las plantas. Los agricultores simplemente hacen una selección de semillas o razas animales de un individuo o una población que ha demostrado las características más deseables, y esto fue suficiente para dirigir la evolución de las especies domesticadas. Gradualmente, conforme aprendimos más acerca de las bases genéticas de la selección y ésta se dirigió específicamente a favorecernos se dio origen a la genética como ciencia.

Hoy, los campos de la biotecnología y la ingeniería genética están cambiando rápidamente la manera en que el humano manipula los genes de las especies domesticadas, permitiéndole incorporar caracte-

rísticas en las plantas y animales de forma y ritmos nunca antes posibles.

Pero desde el punto de vista de la sostenibilidad, el esfuerzo y la dirección del mejoramiento de cultivos de las décadas pasadas – y la dirección propuesta para el futuro – es causa de una conciencia profunda. La base genética de la agricultura se ha acercado a niveles peligrosos conforme la sociedad humana ha incrementado su dependencia de unas pocas especies y organismos y de una cantidad pequeña de genes y combinaciones genéticas en estas especies. Los cultivos han perdido mucho de su base genética para la resistencia a plagas y enfermedades, así como su capacidad de tolerar condiciones ambientales adversas.



FIGURA 14.1

Diversidad de frijoles a la venta en el mercado de la ciudad de Oaxaca, México. Las variedades tradicionales reflejan la diversidad ecológica local y cultural.

ocasionando fallas en el cultivo e incrementando su dependencia del humano que es derivada de un aumento de insumos y tecnologías para mantener las condiciones óptimas de crecimiento. Además, los recursos genéticos de los cultivos mismos, los de los ancestros silvestres, arvenses derivadas, variedades tradicionalmente cultivadas, líneas genéticas y reservas genéticas, han sido reducidos inmensamente. La relación entre genética y agricultura es un tema muy amplio. Este Capítulo explora una pequeña parte de éste, enfocándose en los fundamentos necesarios para entender el papel de la diversidad genética y su búsqueda de la sostenibilidad en la agricultura. Examinaremos los cambios genéticos en la naturaleza y como éstos resultan en una diversidad genética, distinguiendo el proceso que usa el ser humano para dirigir y manipular el cambio genético en los cultivos y luego discutir cómo los recursos genéticos de los cultivos requieren ser manejados eventualmente a nivel de agroecosistema como un todo.

La importancia social y económica concerniente a la genética vegetal y el control sobre el acceso al material genético son considerados en la lectura recomendada al final del Capítulo.

CAMBIO GENÉTICO EN LA NATURALEZA Y LA PRODUCCIÓN DE LA DIVERSIDAD GENÉTICA

Desde la perspectiva del tiempo geológico, la flora y la fauna de la Tierra están cambiando constantemente. Las características físicas y de comportamiento de una especie cambian, aparecen nuevas especies y otras se extinguen. Este cambio llamado evolución, es posible por la manera en la cual las características son pasadas de padres a hijos y está inducido por cambios en el ambiente. Los seres vivos respondieron conforme aparecieron y desaparecieron las glaciaciones, se movieron los continentes, emergieron las montañas y se erosionaron. A través de la selección natural, los cambios y la variación ambiental actuaron sobre los genomas de las especies causando cambios de generación en generación.

La selección genética natural ha creado la diversidad genética encontrada en la naturaleza, la materia prima con que los humanos trabajaron para domesticar plantas y animales y crearon agroecosistemas. Por lo tanto, es importante entender cómo trabaja la selección natural y cómo puede ser aplicada para que el

hombre dirija los cambios genéticos y mantenga nuestros recursos genéticos agrícolas.

Adaptación

El concepto de **adaptación** es básico para entender la selección natural, esto debido a que relaciona el ambiente con una característica de una especie. El término no se refiere a procesos y características resultantes de ese proceso. En términos estáticos, una adaptación es cualquier aspecto en un organismo o sus partes, que tiene valor para permitir al organismo sobrellevar las condiciones ambientales. Una adaptación puede:

- permitir a un organismo usar mejor los recursos.
- proveer protección contra el estrés y presión ambientales.
- modificar el ambiente local para el beneficio del organismo; o
- facilitar la reproducción

Cualquier organismo que existe en la naturaleza tiene que tener muchas y grandes adaptaciones de tal manera que le permitan sobrevivir; en teoría, casi todo el comportamiento de los organismos y sus características físicas son adaptaciones. Otra manera de decir esto es que en cualquier punto en el tiempo, un organismo que exista en la naturaleza como un todo siempre se está *adaptando* a su ambiente.

Las adaptaciones que posee una especie en particular, no se mantienen igual durante un largo período de tiempo. Esto se debe a que el ambiente siempre está cambiando y el organismo está adaptándose continuamente. El proceso por el cual las adaptaciones cambian en el tiempo también se denomina adaptación y es entendido en término de la selección natural.

Variación y Selección Natural

Los individuos de especies que se reproducen sexualmente no son idénticos unos con otros. La variación que existe entre humanos se refleja en otras especies; sin embargo, nosotros no siempre somos capaces de entenderlo. Esta variación natural existe en dos niveles, a nivel de **genotipo** – la información genética portada por un individuo- y a nivel de **fenotipo** – expresión física y de comportamiento del genotipo.



FIGURA 14.2

Variabilidad de calabazas de un productor de la zona de Tabasco, México. Las semillas de un solo fruto fueron utilizadas para la siembra.

El examinar un número de individuos de cualquier población demuestra rápidamente la existencia de la variación fenotípica. Cualquier característica, número de hojas de una planta y tamaño de la cola de un animal entre otros, muestran rangos de variación. Para cada característica existe un valor promedio o moda, si la variación en cada característica es graficada como una distribución de frecuencias, esta tenderá a tener una curva de probabilidad normalmente distribuida (curva en forma de campana). Algunas poblaciones muestran un rango estrecho de variación mientras que para otras este rango es más amplio. Aunque la variación fenotípica no se correlaciona directamente con la variación genotípica, comúnmente esta tiene bases genotípicas significativas.

La variabilidad genética entre la especie es principalmente debido a la naturaleza de la réplica del ADN: el ADN no siempre se replica a sí mismo perfectamente, ocurren errores de diferentes tipos, llamados mutaciones y siempre ocurren con alguna frecuencia. Ya que la réplica del ADN es un requisito previo de la reproducción, nuevos individuos mutantes son generados constantemente. Sin embargo, algunas mutaciones son fatales, detrimenales, neutras

y muy pocas ventajosas o positivas, todas las mutaciones representan diferencias y variabilidad genética. La mayoría de las mutaciones son cambios simples en la secuencia de los nucleótidos de la molécula del ADN, que por sí mismas pueden no tener efecto significativo, pero sumadas y en función del tiempo, pueden resultar en cambios fundamentales, como frutas más grandes, resistencia a las heladas, o el aumento de zarcillos para trepar.

La variabilidad también es producida por la reproducción sexual. Cuando dos individuos se reproducen sexualmente, los genes de cada uno son distribuidos de manera diferente en los diferentes gametos (células sexuales), y el material genético contenido en los gametos es mezclado en una nueva manera cuando los gametos se combinan durante la fertilización. Las variaciones pueden ser introducidas durante la meiosis (la formación de gametos) cuando los cromosomas son borrados o translocados, o cuando cromosomas análogos fallan al separarse en la primera división mitótica.

Este último tipo de "error" crea gametos que tienen dos copias de cada cromosoma (diploide) en vez de uno como es usual (haploide). Si uno de estos gametos diploides se fusiona con un gameto haploide normal resultará un cigoto con tres veces el número de cromosomas haploides, y cuando uno se fusiona con otro gameto diploide no reducido se puede formar un cigoto con cuatro veces el número de cromosomas del haploide. De tal forma que el incremento en el número de cromosomas representa otra fuente de variación genética. Las plantas que tienen más cromosomas que el diploide, son llamadas **poliploides**, típicamente tienen características diferentes que sus ancestros, y ocurren con relativa frecuencia en la naturaleza.

Debido a la variación genética natural, algunos individuos de la población pueden poseer características que otros no tienen, o pueden expresar ciertas características con mayor o menor grado que otros.

Estas características pueden dar al individuo ciertas ventajas ligadas a su ciclo de vida. Estos individuos pueden crecer más rápido, sobreviven una cantidad mayor o tienen algunas ventajas reproductivas. Debido a estos factores, ellos pueden tener mayor cantidad de descendientes que otros individuos, lo cual incrementa la frecuencia de su material genético en la población como un todo. Esto es a través de un proceso de reproducción diferencial que provocan cambios genéticos en las especies a través del tiempo.

La dirección y la forma en que se presentan están determinadas por la **selección natural** – proceso por el cual las condiciones ambientales determinan qué características confieren ventajas- y por lo tanto se incrementa la frecuencia de éstas en la población. Si el ambiente en donde una población vive es totalmente óptimo y nunca cambia, los cambios genéticos pueden ocurrir pero no serán dirigidos por la selección natural. Sin embargo, como el ambiente siempre está cambiando y nunca está en condiciones óptimas por un largo período de tiempo, la selección natural en cierto grado siempre está ocurriendo en algún nivel. En los cambios a largo plazo en factores como el clima, la selección natural está regida por esos cambios ambientales conforme la población de otras especies crece, la aparición de nuevas especies por la migración, la evolución de depredadores y herbívoros, y cambios en el microhábitat ocasionados por la erosión, sedimentación, sucesión y otros procesos.

La selección natural actúa sobre la población y no sobre las especies como un todo. Si la población de una especie está reproductivamente aislada del resto de las especies – esto es, si una barrera física impide el cruce de sus miembros con miembros de otra población – esta población presenta cambios genéticos en una única dirección. Debido a que el ambiente nunca es homogéneo en el espacio ni en el tiempo, la población aislada estará sujeta a una presión de selección diferente a otras poblaciones de la especie. Por lo tanto, la tendencia es la diferenciación de poblaciones que evolucionan en forma diferente. Biogeográficamente, las especies constituyen un mosaico de poblaciones, donde cada una de ellas tiene una base genética con características fisiológicas y morfológicas. Cada población distinta es denominada ecotipo. A través del tiempo evolutivo, un **ecotipo** puede ser tan diferente a otro ecotipo que se convierten en dos especies diferentes.

El proceso de evolución que causa el desarrollo de ecotipos y conlleva a la especiación, está diversificando constantemente la base genética de la biota de la Tierra. En la medida en que especies se extinguen, así nuevas especies están siempre evolucionando, y el genoma de muchas especies existentes se vuelve más variado con el transcurso del tiempo. Hoy día uno de nuestros grandes temores, es que la actividad humana, incluyendo la agricultura, está alterando fundamentalmente estos procesos. Nuestra destrucción, alteración y simplificación de los hábitats naturales están incrementando las tasas de extinción y eliminación de ecotipos, erosionando la diversidad natural genética y el potencial para su renovación (Wilson 1992).

SELECCIÓN DIRIGIDA Y DOMESTICACIÓN

Los cambios genéticos en el contexto de la agricultura difieren mucho de los cambios genéticos que ocurren de forma natural en las poblaciones. Los humanos construyen y manipulan el ambiente en el cual las especies de interés agrícola viven, crecen y se reproducen, creando diferentes escenarios de presión de selección para ellos. El ser humano determina qué características son más deseables y las selecciona mediante el cultivo y propagación de las especies. El ser humano cambia la genética en la población agrícola en forma dirigida, el proceso por el cual estos cambios genéticos ocurren se le llama **selección dirigida**.

Las especies usadas en la agricultura actual fueron domesticadas gradualmente del contexto de los sistemas naturales, donde la selección era dominada en forma natural a sistemas controlados por el ser humano, en los cuales opera la selección dirigida. Hace unos 10 000 a 12 000 años, el humano no creaba ambientes agrícolas estrictamente controlados como lo hace actualmente el agricultor. Ellos cuidaron ciertas especies que existían naturalmente, mediante la modificación de su hábitat, facilitando su reproducción, controlando sus competidores y ocasionalmente moviéndola a lugares más convenientes. La selección natural tuvo un papel importante en esos sistemas, debido a que la intervención humana no fue suficiente para sobrellevar el hecho de que las especies útiles todavía tenían que sobrevivir al rigor de los ambientes naturales.

Sin embargo, conforme el ser humano tuvo más habilidades para modificar, manejar y controlar el

ambiente en el cual las plantas útiles se encontraban, empezó sin intención a seleccionar características específicas. Esto inició el proceso de **domesticación**. Conforme la domesticación progresó, la selección se volvió más intencional, seleccionando semillas con rendimientos altos y más predecibles. Durante el proceso de domesticación, el efecto del ambiente natural se vuelve menos importante y la selección dirigida tiene un papel más decisivo. Eventualmente, las especies agrícolas alcanzan un punto

donde su composición genética, ha sido alterado a tal grado que no pueden sobrevivir fuera de un agroecosistema.

Las especies domesticadas dependen de la intervención del ser humano, y la especie humana es dependiente de animales y plantas domesticadas. En términos ecológicos, esta interdependencia puede ser considerada como un mutualismo obligado. Este se ha dado por un proceso de cambios mutuos: La cultura humana ha causado ambos cambios, en la compo-

TEMA ESPECIAL

Orígenes de la Agricultura

Aproximadamente entre 4 000 y 10 000 años, la agricultura surgió independientemente en muchas áreas diferentes del mundo, cada una con su propia geografía, clima, flora y fauna indígena. Se reconocen seis importantes centros pioneros de desarrollo de la agricultura, estos son mostrados en el mapa de la Figura 14.3. El centro de China es algunas veces dividido en dos subcentros, el valle del río Yangtze en el sur y el valle del río Amarillo en

el norte. El centro del sureste de Asia y del Pacífico sur es difuso, distribuyéndose en un área más grande que la indicada. Algunos investigadores agregan otros centros a la lista: uno en Ohio y el valle del río Mississippi en Norte América y otro en la India.

Estas regiones tienen en común una amplia diversidad biológica natural, clima y topografía variables, culturas humanas dispuestas a aprovechar los beneficios de la producción de alimentos más que su recolección. Debido a que la flora local en cada centro está compuesta por distintas familias y géneros, las plantas domesticadas en cada región varían mucho.

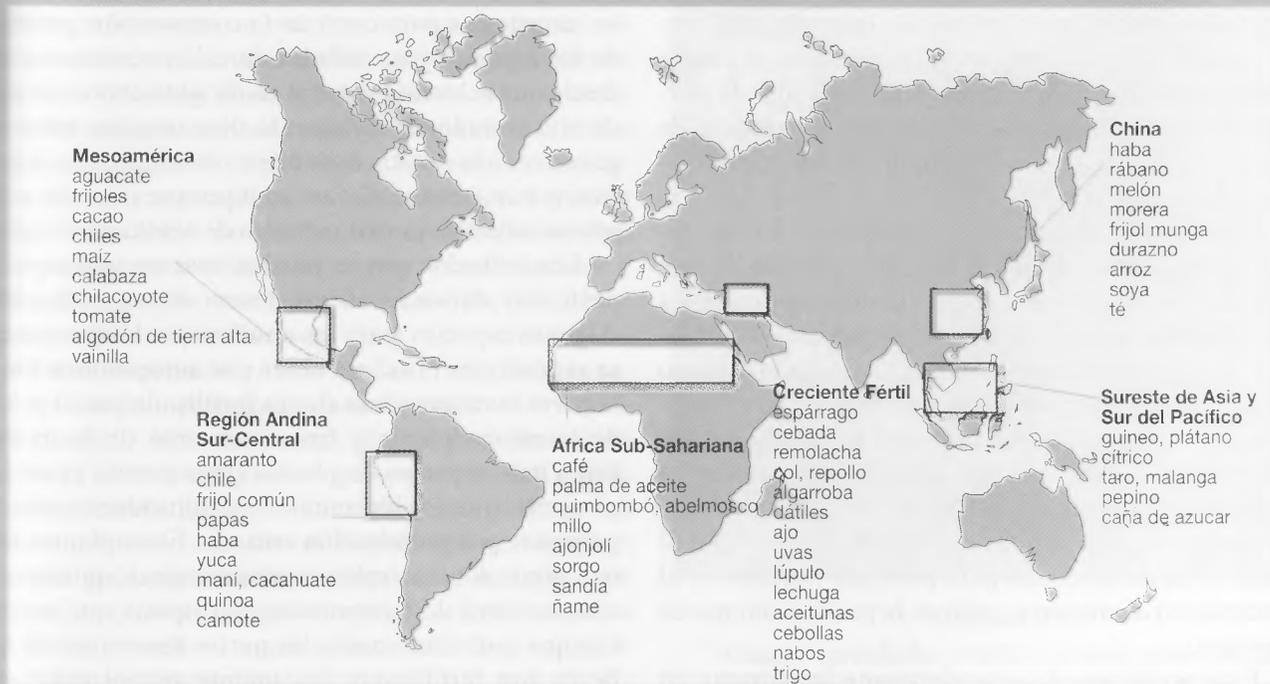


FIGURA 14.3
Centros de desarrollo inicial de la agricultura y domesticación de plantas.

sición genética de ciertas especies útiles y se ha transformado a sí mismo como resultado de estos cambios.

Características Seleccionadas en Cultivos

Actualmente las plantas cultivadas y los animales están sujetos a varias presiones de selección. La humanidad ha seleccionado para buscar la optimización de la producción, sabor y apariencia, uniformidad genética, respuesta rápida a fertilizantes y aplicación de agua, facilidad de cosecha y procesamiento, resistencia a daños de transporte y mayor vida de anaquel.

Este proceso de selección tiene otros objetivos, una alteración significativa en el reparto de carbono: Las plantas domesticadas almacenan mayor proporción de su biomasa en las partes disponibles o cosechables, con respecto a las especies naturales de las cuales se derivaron. Como consecuencia, se asigna menos energía para las características que le confieren **resistencia ambiental** – la habilidad de sobrellevar condiciones de estrés, o factores ambientales limitantes. Además, muchas características que alguna vez le confirieron resistencia ambiental se han perdido del genotipo. Debido a estos cambios fundamentales en las bases genéticas de la fisiología y morfología, muchas variedades y especies domesticadas requieren condiciones óptimas de humedad del suelo, disponibilidad de nutrimentos, ausencia de plagas y enfermedades, temperatura y luz solar, que le permitan tener un buen comportamiento y expresar las características de gran producción por las cuales fueron seleccionadas.

La selección dirigida en la agricultura nos ha llevado a una situación difícil. Nuestras variedades cultivadas más importantes requieren insumos externos como fertilizantes inorgánicos, plaguicidas, e irrigación para poder expresar y tener un comportamiento para el cual fueron diseñadas, sin embargo, estos insumos externos son la causa principal de los efectos negativos de la agricultura en el ambiente y la degradación del suelo. Si se toman medidas para restringir el uso de varias prácticas y materiales que el humano ha desarrollado para proteger y promover el crecimiento de nuestros cultivos, la producción puede disminuir.

Este problema es particularmente importante en lo que respecta a los plaguicidas. Las habilidades na-

turales de las plantas para resistir herbívoros – mediante adaptaciones morfológicas, mutualismo, la producción de compuestos protectores y otros métodos – se han perdido ampliamente debido al desarrollo de otras características. Los agroecosistemas se vuelven dependientes del uso de plaguicidas para prevenir la pérdida de cultivos por herbívoros. No obstante, el uso de estos productos se convierte en una presión selectiva sobre la población de herbívoros, induciendo su evolución y dándole resistencia a plaguicida, por lo que se requiere la aplicación de mayor cantidad de producto o el desarrollo continuo de un nuevo tipo de plaguicida.

Un problema fundamental es que las características de resistencia ambiental se han perdido, no solo de la composición genética de una especie individual y sus variedades, sino de la estructura y organización de todo el agroecosistema (Capítulo 16). Con el propósito de reincorporar la resistencia ambiental al genoma de las plantas cultivadas se debe trabajar a nivel de agroecosistema, y no a nivel de especies individuales o sus variedades.

Métodos de Selección Dirigida

Los agricultores y los fitomejoradores usan diferentes estrategias para cambiar la composición genética de las especies y variedades de cultivos, éstas van desde una selección natural no dirigida a una con ayuda de alta tecnología, trabajando directamente sobre el genoma de la planta. Este último método no es selección *per se*, pero se discute aquí porque tiene los mismos resultados que los métodos de selección dirigida.

Los métodos que se pueden usar en una especie particular dependen de su forma de reproducción. Algunas especies (más las anuales que las perennes) se reproducen principalmente por **autopolinización**: la parte femenina de la flor es fertilizada por el polen de la misma planta y frecuentemente de la misma flor. Otras especies de plantas (más común es en las perennes que en las anuales) se reproducen principalmente por **polinización cruzada**. Estas plantas tienen algunas características morfológicas, químicas y adaptaciones de comportamiento típicas que aseguran que individualmente las partes femeninas de las flores son fertilizadas únicamente por el polen de otro individuo.

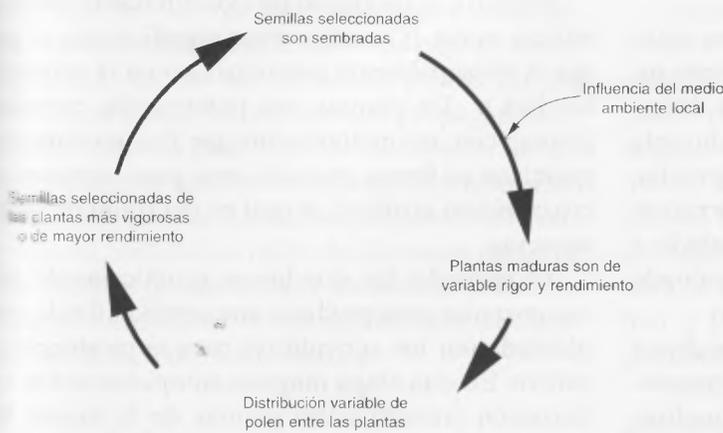


FIGURA 14.4

Proceso de selección masiva. Este método de selección de características deseables mantiene la adaptación a condiciones locales y permite un máximo de variabilidad genética.

Selección Masiva

El método de selección dirigida, que es relativamente reciente, es la recolección de semillas de aquellos individuos de la población que han demostrado una o varias características deseables, tales como alto rendimiento o resistencia a enfermedades y que serán utilizadas en el siguiente ciclo de cultivo. Este método, llamado **selección masiva**, puede producir un cambio gradual en la frecuencia relativa de una característica o características en la población. Mediante los métodos de selección masiva los agricultores del mundo han desarrollado variedades llamadas **razas criollas**, las cuales están adaptadas a condiciones locales y aunque son genéticamente distintas, sus miembros son genéticamente diversos.

La selección masiva funciona en forma similar para plantas autopolinizadas o con polinización cruzada. Cuando se trata de una planta de polinización cruzada la selección masiva que ocurre es una **polinización abierta**. También conocida como polinización abierta, esta mezcla natural de polen entre miembros de una población resulta en alta variabilidad genotípica. Con plantas autopolinizadas, la selección masiva también permite el mantenimiento de una variabilidad relativamente alta.

Este viejo método tradicional de selección dirigida considera a todo el organismo y está basado en la

selección en campo; por lo que es un proceso relativamente lento y de resultados más variables, teniendo la ventaja de ser similar al proceso de selección natural en el ecosistema. Las características que involucran la adaptación a condiciones locales se retienen junto con los aspectos directamente deseables de producción o comportamiento, así mismo, se mantiene la variación genotípica. Estas características son especialmente muy importantes para pequeños sistemas agrícolas con recursos limitados y con más variación en las condiciones de producción. Todos los demás métodos de selección dirigida tienden a incrementar la uniformidad genética y en este proceso, reducir o eliminar de manera importante el papel de las condiciones ambientales locales.



FIGURA 14.5

Cuatro variedades criollas de maíz seleccionadas en forma masiva de las zonas bajas de Tabasco México. Cada variedad local tiene diferentes nombres, fecha de siembra y condiciones ambientales.

Selección de Líneas Puras

Un método común de selección en plantas con autopolinización es escoger aquellas con una aparente superioridad dentro de una población, para luego estudiar en pruebas extensivas la progenie durante varias generaciones. Al final del período de prueba, una línea distinta y superior a las variedades existentes es liberada como una nueva variedad. Debido a que son autopolinizadas, el genotipo seleccionado permanece relativamente estable en el tiempo.

El proceso de selección de líneas puras puede ser modificado de diversas maneras. Una es la transferencia de genes entre líneas puras existentes mediante la polinización cruzada artificial, con la idea de producir una nueva línea con una nueva combinación de características. En algunas ocasiones esto es acompañado de un retrocruce repetido de la progenie de un cruce artificial con un ancestro que tenga alguna característica específica deseable.

Producción de Variedades Sintéticas

En analogía a las líneas puras de las plantas de autopolinización, las plantas con polinización cruzada, son denominadas **variedades sintéticas** o cultivares sintéticos. Estas pueden ser creadas con gran variedad de técnicas. El principio más importante es limitarse a pocos genotipos originales que son reconocidos por sus características superiores y porque generan buenos cruces. Por ejemplo en alfalfa, esto puede ser posible al usar semillas de pocas fuentes específicas (dos o tres líneas clonales), en un área aislada y permitiendo que el cruce natural ocurra. Las semillas producidas en esta área son distribuidas como una variedad sintética. Las variedades sintéticas tienen mayor variabilidad genética que las variedades de líneas puras de plantas autopolinizadas, pero tienen menos variabilidad que la selección masiva de variedades con polinización abierta.

Hibridación

Actualmente, el método de selección dirigida más importante para cultivos – especialmente maíz – es la producción de variedades híbridas. Un híbrido es un cruce entre dos progenitores diferentes, cada uno proveniente de una diferente línea genética pura. El proceso para la creación de una variedad híbrida comprende dos etapas básicas.

Primero, se producen las dos diferentes líneas genéticas puras. (Genotipo puro significa que el genoma es principalmente homocigótico en la mayoría de los loci.). En plantas con polinización cruzada (y plantas con autopolinización que frecuentemente se polinizan en forma cruzada), este paso representa un cruzamiento artificial, el cual es realizado de muchas maneras.

El segundo, las dos líneas genéticamente puras son cruzadas para producir una semilla híbrida que es plantada por los agricultores para la producción del cultivo. En esta etapa ninguna autopolinización o polinización cruzada entre plantas de la misma línea puede ocurrir, requiriéndose el uso de ciertas técnicas. Una técnica usada en maíz, es plantar la línea donadora de polen y la línea productora de semilla con un arreglo de hileras intercaladas, a las plantas productoras de semilla se les remueve la inflorescencia antes de que produzca polen (la inflorescencia únicamente contiene flores masculinas). Una técnica alternativa ampliamente utilizada en plantas autopolinizadas como el sorgo, es introducir plantas cuya esterilidad masculina está genéticamente controlada, llamada **citoesterilidad**, dentro de una de las líneas progenitoras. Entonces esta línea es utilizada como la línea progenitora productora de semillas, ya que puede ser polinizada únicamente con polen de otra línea progenitora no estéril.

La descendencia del híbrido de dos progenitores selectivamente cruzados es usualmente diferente a sus progenitores. Ellos son más grandes y producen semillas y frutos más grandes, o tienen algunas otras características deseables que los progenitores no poseen. Esta respuesta es conocida como **vigor híbrido** o **heterosis** y es una de las grandes ventajas de las variedades híbridas. Otra característica deseable (desde el punto de vista de la agricultura convencional) es la uniformidad genética: todas las semillas híbridas de un cruce particular tendrán el mismo genotipo.

Sin embargo, las variedades híbridas tienen una desventaja inherente. Las semillas producidas por plantas híbridas – de auto o polinización cruzada – normalmente no son consideradas para volver a utilizarse como semillas, ya que la recombinación sexual producirá una variedad con una nueva combinación de genes, la mayoría de las cuales no exhibe el vigor híbrido. Por lo tanto, los agricultores deben de comprar semillas híbridas años tras años a quienes las producen.

En el tipo de cultivos con tubérculos y otras formas de reproducción asexual, como las papas y los esparagos, una vez que un híbrido es producido con características deseables, entonces es propagado asexualmente como un **clon**. Con los avances en las técnicas de cultivo de tejidos este método de propagación de híbridos sin semillas ha sido ampliamente utilizado. Una pequeña cantidad de tejido de diferentes partes de cultivos híbridos de importancia económica, puede ser utilizada para reproducir clones rápidamente bajo condiciones estrictamente controladas.

Poliploides Inducidos

Varios cultivos de interés actual como el trigo, maíz, café y algodón se originaron hace mucho tiempo como poliploides naturales. Ya que las plantas poliploides son frecuentemente más robustas, tienen frutos y semillas más grandes que sus progenitores diploides, la gente los ha considerado deseables cuando están presentes en las etapas tempranas de los sistemas, y son seleccionados aunque los agricultores no sepan qué los hace diferentes.

Cuando los citólogos modernos descubrieron que muchas de las características deseables de los cultivos eran resultado de la poliploidea, se desarrollaron métodos para inducirla artificialmente. Con el uso de la colchicina y otros estimulantes químicos durante los primeros estadios de la meiosis, ha sido posible la multiplicación artificial del número de cromosomas. La poliploidea ha producido algunos de las líneas de trigo más útiles, por ejemplo, el hexaploide *Triticum aestivum*. Una vez producidos, los poliploides por sí mismos pueden ser usados para perpetuar líneas puras o desarrollar nuevos híbridos.

Biotecnología

El fitomejoramiento, usando las técnicas descritas anteriormente, es tedioso, ya que éstas consumen mucho tiempo y dependen del azar. Puesto que los genes tienen acompañados de miles o millones de otros genes en los cromosomas, los fitomejoradores no pueden determinar fácilmente cómo unos pocos genes de interés se distribuyen y recombinan en cada generación. Además, estas técnicas están restringidas a progenitores que están estrechamente relacionados, comúnmente dentro de la misma especie.

Estas limitaciones han sido superadas por los avances recientes en genética molecular. Ahora es posible, mediante técnicas de **ingeniería genética**, el transferir un solo gen de un organismo a otro completamente diferente. Los genes han sido satisfactoriamente transferidos, por ejemplo, de bacterias a plantas. La ingeniería genética tiene el potencial para introducir características específicas, como resistencia a heladas o a herbívoros dentro de cualquier cultivo y para ciertos organismos con características predeterminadas.

La ingeniería genética ha sido considerada para una respuesta tecnológica, para enfrentar el problema de mayor producción de alimentos para el futuro; sin embargo, esto tiene muchas limitaciones y problemas potenciales. Primero, porque que los genes de un organismo actúan de manera conjunta, con gran interacción y modificación entre ellos, lo que hace imposible predecir el efecto de adicionar un gen, especialmente en el caso del gen de un organismo completamente diferente. Segundo, debido a que la mayoría de las características de desarrollo y crecimiento de un organismo, como el vigor y el rendimiento, son altamente complejos, poco comprendidos y controlados por múltiples genes, se hace difícil modificar estas características en una vía predecible con la ingeniería genética. En tercer lugar, los organismos transgénicos tienen el potencial de ser altamente peligrosos: una bacteria generada por ingeniería genética podría llegar a ser patógena y los cultivos de ingeniería genética podrían volverse una arvense agresiva en ecosistemas locales. Y en cuarto lugar, la ingeniería genética tiene todos los riesgos de las otras técnicas modernas de fitomejoramiento, que serán discutidas a continuación.

Consecuencias del Fitomejoramiento Moderno

El fitomejoramiento, basado en los avances de nuestro conocimiento sobre la genética vegetal, ha tenido el innegable beneficio de contribuir a los dramáticos incrementos en los rendimientos del siglo XX. Pero esto también ha sido la base de la tendencia a incrementar la uniformidad de los recursos genéticos en la agricultura. Dicha uniformidad genética cumple importantes funciones en la agricultura moderna. Sin embargo, esto también puede afectar la sostenibilidad de la agricultura a largo plazo, por la reducción

TEMA ESPECIAL

Beneficios y Riesgos de la Ingeniería Genética

La ingeniería genética es un campo muy novedoso en el fitomejoramiento. Está permitiendo al ser humano transferir genes específicos de una especie a otra independientemente de la relación entre los organismos, esto permite nuevas posibilidades en el "diseño" de organismos agrícolas. En la comunidad agrícola muchos ven en esta nueva capacidad un gran potencial para aumentar la productividad y disminuir el uso de plaguicidas; otros están preocupados por las consecuencias no previstas de la utilización de plantas transgénicas o derivadas de ingeniería genética para la producción agrícola (Snow y Palma 1997).

Una de las áreas más importantes de investigación se refiere al aislamiento y transferencia de genes que confieren resistencia a plagas o a plaguicidas. El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) ha puesto normas para el proceso de regulación de este trabajo, eliminando la necesidad de obtener permiso para la investigación en muchos cultivos comunes substituyéndolo solo con el proceso de notificación. Por el contrario, la investigación sobre los riesgos de los cultivos transgénicos se ha pasado por alto; en los últimos cinco años destinaron sólo el 1% de sus recursos para investigar el riesgo de la biotecnología.

Uno de los esfuerzos de investigación que ha sido criticado por los ecologistas es la transferencia de genes de la bacteria *Bacillus thuringiensis* (Bt) a cultivos. El Bt produce químicos que son letales para muchos insectos plaga y son inocuos para mamíferos, esto es una combinación deseable y única. Los

extractos de Bt han sido usados como una alternativa a los plaguicidas convencionales por varias décadas, pero estos tienen altos costos de producción y se degradan rápidamente, y debido a estas desventajas han sido usados en escala limitada. Recientemente, los investigadores han transferido satisfactoriamente genes para la producción de toxinas Bt de la bacteria a cultivos comerciales, logrando que las plantas "se protejan ellas mismas" produciendo sus propios insecticidas.

A escala comercial, la producción de algodón-Bt comenzó en 1996. A pesar de que el algodón Bt reduce el uso de plaguicidas, muchos científicos argumentan que su amplio establecimiento incrementará la probabilidad de que los insectos desarrollen resistencia a la toxina Bt. De acuerdo con algunas estimaciones, la siembra de cultivos a escala comercial con plantas que producen la toxina-Bt y utilizando los métodos actuales, puede conducir a la evolución de variantes de insectos resistentes entre tres y cinco años. Y debido a que las toxinas Bt actualmente disponibles son de los plaguicidas ambientalmente aceptables su pérdida podría ser irreparable.

Aunque Monsanto, la compañía que liberó el algodón Bt, incluyó un plan para evitar la resistencia en sus informes para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), muchos científicos han expresado su preocupación de que la estrategia en el plan no está demostrada y que hay un pequeño margen de error. Los científicos y grupos ambientalistas han pedido una moratoria sobre el uso de los cultivos Bt, para permitir más tiempo para hacer investigación sobre la prevención de resistencia. A pesar de esta oposición, la EPA aprobó al inicio de 1997 la liberación de dos nuevos cultivos Bt: maíz y papas.

de la diversidad genética en muchos niveles, haciendo a los cultivos más vulnerables a plagas y cambios ambientales e incrementando la dependencia de los sistemas de cultivo a la intervención humana y a los insumos externos.

Pérdida de Diversidad Genética

Todos los organismos superiores poseen estructuras genéticas muy complejas. Con gran cantidad de genes – una planta puede tener más de 10 millones – todos actuando en forma conjunta, de manera compleja

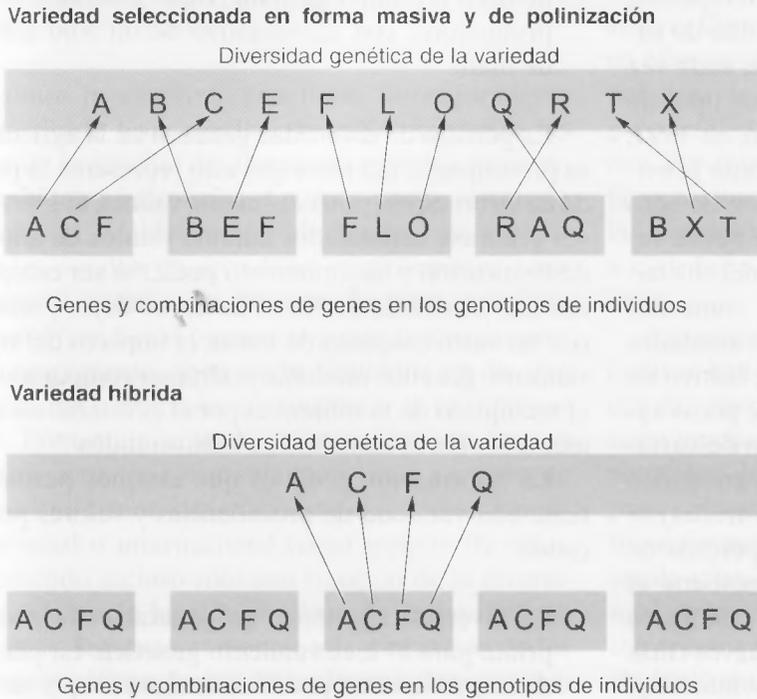


FIGURA 14.6
Variabilidad genética en una variedad de cultivo seleccionada en forma masiva y una variedad de cultivo híbrida.
 En una variedad seleccionada en forma masiva, la diversidad genética total es mucho mayor que la de cualquier individuo; en una variedad híbrida, cualquier individuo tiene toda la diversidad genética de la variedad.

para controlar el funcionamiento de los organismos y las interacciones con su ambiente. Algunos genes actúan solos, pero la mayoría parece actuar en combinaciones complejas con otros. En la naturaleza cada especie, como totalidad genética, o genoma, es el producto de un largo proceso evolutivo, como se describió anteriormente. El genoma como un todo, es típicamente muy diverso, debido a que fue desarrollado a partir de muchos genotipos individuales, muchos o todos ellos fueron únicos.

Los métodos tradicionales de selección masiva, a pesar de cambiar el genoma contenido en una especie, tienden a conservar mucha de su riqueza en estructura genética. En contraste, el fitomejoramiento moderno tiende tanto a alterar como a reducir el genoma de una especie, por enfocarse sobre la optimización de uno o pocos genotipos de la especie. A pesar de que este proceso ha creado plantas que se comportan muy bien en ambientes específicos, altamente alterados para la agricultura moderna, esto también ha restringido ampliamente las bases genéticas de las especies o variedades. En un extremo de escala de uniformidad, la diversidad genética de una variedad de cultivo es restringida a un simple genoma, como en el caso de la semilla de un híbrido. Mientras que en el otro extremo de la escala, la di-

versidad genética de una selección masiva, una variedad de polinización abierta es el producto de incontables genomas individuales únicos. La Figura 14.6 ilustra este contraste en la estructura de la diversidad genética.

La producción comercial de híbridos y variedades de alto rendimiento, han acaparado el mercado de semillas, que son ahora establecidas sobre grandes superficies con uniformidad genética. Menos razas animales son usadas para producción de carne y otros productos animales. Cada vez más el alimento consumido en el mundo es generado de un "pool" genético cada vez más estrecho. Como resultado, nuestros cultivos han sufrido lo que podemos llamar **erosión genética** – la pérdida de la diversidad genética.

Como resultado del fitomejoramiento y otras prácticas de la agricultura comercial, la erosión genética actúa en varios niveles.

- A nivel de la agricultura como un todo, puesto que muy pocos cultivos abastecen la mayoría de los alimentos para todo el mundo. Por ejemplo, más del 60% de la producción mundial de comida y alimentos, proceden de granos y de éstos, más de la mitad de su producción total es de cuatro especies de gramíneas - trigo, arroz, maíz y cebada.

- A nivel de tipos específicos de cultivos o especies, pocas variedades, cultivares y razas criollas de cada cultivo son plantados mundialmente, cada vez con una mayor reducción en el número de tipos de cultivo para la producción. Por ejemplo, en 1993, el 71% del cultivo de maíz comercializado proviene de seis variedades, el 65% del arroz de sólo cuatro variedades y el 50% del trigo de nueve variedades. Otros ejemplos, como el caso del chícharo, donde el 96% de la producción comercial proviene de dos variedades, y cuatro variedades de papa producen más del 70% de este cultivo en el mundo. Debido a esta dependencia de pocas variedades, muchas de las más antiguas son descartadas. Por ejemplo, más de 6 000 variedades conocidas de manzana (86% de las registradas) se han extinguido desde 1900. La misma pérdida de diversidad se ha visto en animales domésticos: el 70% del hato lechero en los Estados Unidos es Holstein y casi toda la producción de huevos (más del 90%) es obtenida de una raza, la White Leghorn. ¡Nos estamos acercando a poner solo un huevo en nuestras canastas!
- A nivel de variedades individuales o cultivares, la homogeneidad genética es más la regla que la excepción. Las técnicas empleadas para producir líneas puras y variedades sintéticas, garantizan que el abastecimiento de semillas de cualquier variedad particular llegue a ser altamente uniforme. Es el caso de los híbridos, los cuales solamente contienen un simple genoma. En otras palabras, todas las plantas provenientes de estas semillas, son virtualmente idénticas genotípicamente. Esto contrasta ampliamente con la selección masiva, con variedades de polinización abierta, donde la disponibilidad de semillas necesariamente implica gran diversidad y no solamente dos genomas parecidos.
- A nivel de una región agrícola, menos tipos de cultivos son establecidos y para cada uno de estos, se tienen pocas variedades. Por ejemplo, tres variedades de naranja proveen el 90% del producto cosechado en el estado de Florida. Esta pérdida de diversidad regional está ocurriendo en respuesta a la dinámica global de los mercados, que promueven que las regiones sean más especializadas en su producción agrícola.
- Al nivel de las granjas y productores individuales, existe tendencia por establecer una sola línea ge-

nética o un simple genoma, como es el caso de los productores con monocultivo de un solo híbrido de maíz.

La pérdida de diversidad genética en la agricultura es preocupante, debido a que esto representa la pérdida de información potencialmente valiosa. Si los recursos genéticos acumulados durante cientos de años de domesticación y mejoramiento pudieran ser comparados con una biblioteca llena de libros viejos y nuevos, con un vasto conjunto de temas, el impacto del mejoramiento genético moderno podría ser comparado con el reemplazo de la biblioteca por el préstamo de solamente los libros actualmente más vendidos.

La información genética que estamos perdiendo tiene una variedad de procedencias y valores potenciales.

- La diversidad genética en general es la materia prima para el mejoramiento genético. La pérdida de esta diversidad puede restringir las oportunidades para los esfuerzos futuros de mejoramiento genético.
- La diversidad genética de especies o tipos de cultivo, como es expresada por la existencia de muchas razas criollas, permite el establecimiento de variedades que están bien adaptadas a las condiciones particulares de localidades específicas. Esto hace que estas variedades locales produzcan con mayor consistencia en el tiempo, sin grandes necesidades de insumos externos, siendo por lo tanto una base para la sostenibilidad.
- La diversidad genética en una variedad de cultivo o cultivar, es un componente importante de la resistencia ambiental, permitiendo proteger contra pérdidas totales debidas a enfermedades, ataques de herbívoros, o variaciones imprevistas en las condiciones ambientales.
- La diversidad genética es también un reservorio de resistencia ambiental potencial. Algunos individuos de una variedad de cultivo genéticamente diversa, pueden tener genes o combinaciones de estos, que pueden conferir resistencia para futuros eventos de condiciones, como la dispersión de una nueva enfermedad. Estos genes pueden ser seleccionados para proporcionar resistencia a la población.
- La diversidad genética proporciona flexibilidad en un sistema, la habilidad para ajustarse y adap-

tarse a cambios en condiciones de una estación a otra y de una década a otra.

Algunos productores, genetistas, fitomejoradores y otros, desde hace muchos decenios, han visto los riesgos de la pérdida de diversidad genética en nuestros cultivos alimenticios. Lo que como respuesta promovió el establecimiento de "bancos de genes", donde las semillas de variedades y cultivares, no para uso general, podrían ser almacenados para su utilización posterior. Estos bancos de genes tienen un propósito importante, pero están limitados en lo que ellos pueden hacer para contrarrestar la erosión genética. Primero, porque la gran mayoría de bancos genéticos actuales solamente mantienen reservas de cultivos que tienen programas de investigación a nivel nacional o internacional como soporte de estos, manteniendo incluso solo una fracción de la diversidad genética que ha sido recolectada de los cultivos protegidos. Segundo, el manejo y la evaluación de los recursos genéticos dentro de los bancos de genes son a menudo incompletos, de manera que existe deterioro de los materiales genéticos. Tercero, las colecciones de germoplasma son realmente estáticas, sin incorporación de los procesos básicos que mantienen y crean diversidad genética, incluyendo las presiones de selección tanto del ambiente como culturales. Desafortunadamente nunca sabremos cuántas variedades se han perdido, particularmente en el caso de la gran cantidad de cultivos menores que permiten enfrentar las necesidades locales alrededor del mundo, pero que no son parte de los esfuerzos actuales de conservación de germoplasma.

Vulnerabilidad Genética

Las consecuencias de la pérdida de diversidad genética en cultivos requieren una discusión más amplia. Esto es la **vulnerabilidad genética**, o la susceptibilidad del reducido "pool" genético de las plantas y animales por el ataque de plagas o enfermedades, o las pérdidas causadas por cambios extremos en el ambiente. El problema básico es que cuando en un área amplia el cultivo es genéticamente uniforme, se mantienen las condiciones ideales para el crecimiento explosivo de la población de una plaga o enfermedad.

Las poblaciones de plagas y enfermedades presentan tasas de evolución relativamente rápidas, debido

en parte al corto periodo de tiempo generacional que tienen. Con esta capacidad de rápido cambio genético ellas se adaptan rápidamente a los cambios en las defensas de sus hospedantes - o a factores (como los plaguicidas) introducidos al ambiente por los humanos. Por esta razón las plagas y las enfermedades en la agricultura han sido capaces de sobrellevar lo que las ciencias agrícolas han generado, desde plaguicidas y variedades resistentes, hasta nuevas prácticas culturales.

En agroecosistemas tradicionales, en los cuales los cultivos han estado sujetos simultáneamente a presiones de selección naturales y humanas, el sistema mantiene muchas de las características de los ecosistemas naturales, de manera que los cultivos tienen ventaja para enfrentar a patógenos y herbívoros. Pero con el fitomejoramiento moderno, los monocultivos en gran escala y la uniformidad de las prácticas agrícolas, hemos dado ventajas a las plagas y enfermedades. Nos esforzamos por cambiar los mecanismos de resistencia tanto genéticos como ambientales de cultivos mejorados con características específicas, más que la fortaleza general, y por el establecimiento de una sola población de cultivo en gran escala al mismo tiempo y en el mismo lugar. Esto crea un ambiente más uniforme y predecible que podría, bajo otras circunstancias, impedir que ocurra un brote explosivo.

Uno de los ejemplos mejor conocidos de los peligros de la uniformidad genética es la papa irlandesa. Este cultivo en 1846 fue destruido por el hongo *Phytophthora infestans*, que destruyó la mitad de las plantaciones en Irlanda, causando hambruna que forzó a un cuarto de la población a emigrar. La enfermedad ocurrió debido a que los productores de papa dependían solamente de dos genotipos que habían sido traídos a ese país hacía 300 años y desde entonces propagados vegetativamente. La enfermedad tuvo un profundo impacto debido a que el país llegó a ser dependiente de la papa como fuente alimenticia rica en carbohidratos. El hongo estuvo bien adaptado al frío y a las condiciones de humedad de la región, y una vez que la enfermedad llegó y se estableció no hubo forma de detenerla. Resulta interesante que el mismo hongo también se encuentra en el lugar de origen de la papa, en los Andes de Sur América, pero la gran diversidad genética de papa allí, combinada con un proceso continuo de selección natural, asegura que gran proporción del cultivo sea resistente.

Otro ejemplo bien conocido es el brote de la roya del maíz (corn leaf blight) (*Helminthosporium maydis*) en 1970-1971, que destruyó casi todo el cultivo en las áreas de Illinois e Indiana, provocando la pérdida de más del 15% del volumen total del maíz de los Estados Unidos (Ullstrup 1972). Este brote está relacionado con los factores genéticos de citoesterilidad mantenida en las líneas de maíz utilizadas para producir la semilla híbrida. Estos factores producen esterilidad en las inflorescencias masculinas y eliminan la necesidad del costoso control manual durante la polinización, pero también incrementan la susceptibilidad de los híbridos a la roya. Y cuando aparece una nueva cepa de la roya, ésta se dispersa rápidamente. Los productores de semillas y fitomejoradores fueron capaces de responder rápidamente y alterar la combinación de factores de susceptibilidad para el ciclo de 1972.

Problemas similares se han presentado con el arroz en el sureste de Asia. El Instituto de Investigaciones Internacionales de Arroz, ha estado liberando variedades con resistencia para plagas específicas, las cuales son promovidas para su cultivo en amplias áreas geográficas. Al corto tiempo de que cada variedad es adoptada y establecida ampliamente, se desarrollan nuevos biotipos de plagas que superan la resistencia y diezman los rendimientos de los cultivos. Este problema ha ocurrido repetidamente con el chinche café (brown leaf hopper), común en toda la región de cultivo del arroz. Cada nueva variedad de arroz se mantiene solamente dos o tres años antes de que su nivel de resistencia sea superado por la rápida evolución de la plaga (Chang 1984). La lección es clara: tan pronto como solo unas cuantas pocas variedades dominan, las plagas son capaces de tomar ventaja de la baja diversidad genética del cultivo y superan su resistencia. Cuando ocurre el fracaso, los productores quedan totalmente dependientes de la infraestructura que produce nuevas variedades resistentes (o de la que provee plaguicidas sintéticos), ya que ellos nunca más tendrán acceso a la variabilidad genética que podría estar presente en sus propios campos (Altieri y Merrick 1988).

En muchas formas la agricultura en los países desarrollados en los últimos tres decenios ha enmascarado el problema de la vulnerabilidad genética. Los excedentes de cosechas en algunas regiones pueden compensar las pérdidas. Pero las pérdidas regionales

todavía están ocurriendo y existe el potencial de pérdidas en gran escala.

Dependencia Creciente de la Intervención Humana

Un híbrido moderno virtualmente no es de gran ayuda fuera de los confines de la granja, puesto que usualmente no se puede reproducir por sí mismo a partir de su semilla. En un extremo, el cultivo no puede ser viable en un sistema agrícola sin un tipo de tecnología intensiva muy específica, basada en la modificación humana y control del ambiente de la granja. Esta situación ilustra el importante vínculo entre el fitomejoramiento moderno y la dependencia de la agricultura de insumos externos, mecanización, expertos externos a la granja. La reducción dramática de la diversidad genética de nuestros cultivos ha ocurrido paralela y estrechamente relacionados con los dramáticos incrementos en producción de plaguicidas y fertilizantes, irrigación, mecanización y uso de combustibles fósiles.

Cuando un productor abandona sus variedades locales por los híbridos, esto implica más que la compra de la semilla del híbrido. Todo híbrido tiene un paquete de insumos y prácticas asociadas con la semilla: equipo de preparación del suelo, sistemas de irrigación, acondicionadores del suelo y fertilizantes, productos para control de plagas y otros insumos agrícolas externos a la granja. El paquete también incluye cambios en muchos otros aspectos de la organización y manejo de la granja. Para recuperar la inversión necesaria para pagar los nuevos insumos y equipos, los productores a menudo deben intensificar la producción de cultivos más rentables. Esto comúnmente requiere la concentración de la producción en muy pocos cultivos, la dependencia de estructuras de mercado centralizadas, mayor cantidad de mano de obra asalariada, intensificación de insumos para reducir los riesgos y posibilidades de fallas en el cultivo. Se requiere asesoría técnica (que usualmente se paga) de fuentes ajenas a la granja. El sistema agrícola completo es forzado a cambiar.

Estos cambios a menudo ocasionan pérdida de conocimiento tradicional local que los productores tienen sobre los cultivos, el sistema y los procesos agrícolas, confiando en la información genética



FIGURA 14.7
Algodón perenne silvestre
(*Gossypium sp.*), Tabasco,
México. *Todavía se pueden*
encontrar las plantas silvestres
emparentadas con cultivos in situ
en los sistemas agrícolas
tradicionales.

se desarrollada bajo condiciones altamente modificadas y de alta homogeneidad. El resultado final es la pérdida de la diversidad genética local y la experiencia cultural que caracterizaba a los sistemas agrícolas antes de la modernización.

Pérdida de Otros Recursos Genéticos

La agricultura depende no sólo de la diversidad genética de los cultivos y animales domesticados. También es importante la diversidad genética de un arreglo de otros organismos: (1) organismos en los ecosistemas naturales que rodean a los agroecosistemas, especialmente las plantas silvestres emparentadas con los cultivos; (2) cultivos de menor importancia económica; y (3) organismos benéficos no agrícolas, tales como parasitoides, arvenses alelopáticas, árboles y organismos del suelo.

Las plantas silvestres emparentadas con cultivos, son importantes como fuentes de nueva variación en el proceso de selección dirigida. Ellas han sido fuentes importantes de nuevo o de material genético resistente, especialmente para enfrentar eventos de epidemias como las descritas anteriormente. Sin embargo, las plantas silvestres emparentadas con cultivos, tales como el algodón silvestre mostrado en la Figura 14.7, están desapareciendo rápidamente en muchas partes del mundo debido a la deforestación y otras formas de modificación del hábitat.

Una clase similar de organismos con valor potencial es el cruce natural entre una variedad agrícola que ha escapado y sus plantas silvestres emparentadas. Tales cruces también están en peligro, debido a que los hábitats donde los cultivares y sus parientes silvestres pueden intercambiar material genético, también se están volviendo escasos, principalmente debido a la dispersión de semillas de híbridos en las partes agrícolas más remotas del mundo, la simplificación del ambiente agrícola que acompaña el uso de variedades mejoradas, y la creciente separación entre ecosistemas agrícolas y naturales.

Diversos hábitats agrícolas también poseen muchas especies de cultivos agrícolas menores que son de importancia considerable para el sistema entero. Debido a que proveen una serie de productos útiles cosechables, estos cultivos contribuyen a la diversidad ecológica del sistema. Son parte del sistema completo, de los procesos de flujo de energía y de reciclaje de nutrimentos. Los cultivos menores sin valor o de escaso valor comercial son preservados en muchos sistemas tradicionales de cultivo, especialmente en los países del mundo en desarrollo. Estos podrían tener un valor prometedor de uso futuro, sin embargo, ellos también están desapareciendo conforme los sistemas tradicionales son sustituidos por la modernización.

Además de los cultivos y las plantas emparentadas con estos cultivos, los agroecosistemas también están conformados por una diversidad de plantas no cultivadas y animales que incluyen depredadores y parásitos de plagas, arvenses alelopáticas y organismos benéficos del suelo. Muchos de los cuales pueden jugar papeles muy importantes para mantener la diversidad y estabilidad de todo el sistema (Capítulo 16). Ya que de su presencia y diversidad genética depende en gran medida la diversidad de todo el sistema; ellos están amenazados por la tendencia hacia la uniformidad del agroecosistema.

En general, se necesita poner más atención a toda la diversidad genética de los agroecosistemas. Un cultivo y sistema agrícola funcionando completamente, preserva todos los procesos de la diversidad genética, ecológica y cultural que originan diversidad. Resulta de gran valor agroecológico la preservación de estas bases de información genética; donde todos los componentes interactuando activamente como un todo, conservan información útil para control biológico, defensas de las plantas, simbiosis y competidores. Esto porque sólo una fracción de toda esta información está en el germoplasma de los cultivos clave, y la pérdida de los hábitats agrícolas puede ser más devastadora que la reducción del mismo "pool" genético de los cultivos.

MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA LA SOSTENIBILIDAD

La sostenibilidad requiere un cambio fundamental con respecto a cómo manejamos y manipulamos los recursos genéticos en los agroecosistemas. El tema clave en este cambio es la diversidad genética. Los agroecosistemas sostenibles son genéticamente diversos en todos los niveles, desde el genoma de los organismos individuales, hasta el sistema como un todo. Y esta diversidad podría ser producto de la coevolución - los cambios genéticos podrían haber ocurrido en un ambiente de interacción entre las poblaciones. De esta forma, todos los organismos componentes, plantas de cultivo, animales, plantas asociadas no cultivadas, organismos benéficos y otros, están adaptados a las condiciones locales y la variabilidad local del ambiente, además de poseer características que los hacen específicamente útiles al ser humano.

Los agroecosistemas tradicionales, indígenas y locales, contienen muchos de los elementos genéticos

de sostenibilidad y podemos aprender de ellos. En particular, ellos tienen mayor diversidad genética dentro de sus poblaciones, así como en la comunidad de cultivos como un todo. El cultivo intercalado es mucho más común, las especies no agrícolas y las plantas silvestres relacionadas están presentes dentro y alrededor de los campos de cultivo, de manera que existen amplias oportunidades para la diversificación genética a nivel de campo. En tales sistemas, la resistencia al estrés ambiental y las presiones bióticas tienen una base genética mucho más amplia, la vulnerabilidad genética es menor y aunque las plagas y enfermedades existen, los ataques catastróficos son raros. En esencia, el cambio genético en estos sistemas ocurre como en los ecosistemas naturales.

Resistencia Perdurable

El fitomejoramiento agrícola se ha enfocado principalmente en crear resistencia a factores limitantes del ambiente, incluyendo factores físicos como sequía, suelos pobres y temperaturas extremas, o factores biológicos como daño de herbívoros, enfermedades y competencia con arvenses. Con estos programas de mejoramiento se han logrado importantes incrementos en los rendimientos, pero como ya hemos señalado, otro resultado es una creciente vulnerabilidad al debilitamiento de los cultivos y creciente dependencia de insumos no renovables.

Conforme cada problema se presenta por sí mismo, los fitomejoradores exploran la variabilidad genética de un cultivo hasta que encuentran un genotipo resistente. Esta resistencia es a menudo provista por un solo gen. La transferencia de genes y las técnicas de retrocruce descritas anteriormente son empleadas para incorporar el gen dentro de una variante genética específica de un cultivo. Esto tiene como resultado la llamada resistencia vertical. Su debilidad es que la resistencia continuará funcionando solamente mientras el factor limitante no cambia. Desafortunadamente, en el caso de plagas, enfermedades y arvenses, los factores limitantes nunca permanecen estáticos por mucho tiempo, debido al proceso continuo de selección natural. De manera que el organismo problema eventualmente desarrolla "resistencia a la resistencia" y se presenta un brote o epidemia. Esta dinámica es la base de los muy conocidos procedimientos de los fitomejoradores.

Se requiere un tipo de resistencia más perdurable, que no se pierda ante la presencia de nuevas variantes de las plagas, enfermedades o arvenses. Más que dirigir los programas de fitomejoramiento hacia el desarrollo de resistencia a aspectos específicos, la meta es manejar el sistema de cultivo como un todo. La selección para la resistencia perdurable requiere la acumulación de una diversidad de caracteres de resistencia usando métodos de mejoramiento a nivel poblacional, y requiere la comprensión de la naturaleza simultánea de la interacción entre el cultivo, las plagas, el ambiente y el manejo humano. La selección se efectúa a todos los niveles al mismo tiempo, más que para un solo carácter específico. El resultado es un tipo de resistencia más perdurable, llamado resistencia horizontal (Robinson 1996).

Los métodos de mejoramiento que proveen la resistencia más perdurable se basan en el uso de variedades locales adaptadas de polinización abierta. Los cultivos de polinización abierta generalmente tienen rendimientos más bajos, si se comparan con los híbridos, pero tienen una alta respuesta para las presiones de selección local debido a su diversidad genética. También tienen mejor comportamiento promedio frente a la combinación de todos los factores ambientales locales, incluyendo plagas, enfermedades y arvenses.

La importancia de la resistencia a nivel de sistema es aceptada más fácilmente por los ecólogos que por los científicos agrícolas. El estudio de la selección en ecosistemas naturales ha demostrado repetidamente las formas en que un ecotipo es capaz de responder, tanto a las presiones de selección positivas o negativas, cuando éste es introducido en un ecosistema diferente en el cual evolucionaron. La selección opera simultáneamente a nivel de todos los factores bióticos y abióticos que el organismo encuentra. Desde esta óptica, los problemas asociados con la uniformidad genética en los cultivos se vuelven más claros.

Selección *In Situ* y Conservación de Recursos Genéticos

La erosión genética y pérdida de recursos genéticos ha llevado al establecimiento en 1974, del Banco Internacional de Recursos Genéticos Vegetales (IBPGR). Para establecer el banco de genes del sistema IBPGR se ha establecido una red internacional para el depósito de germoplasma de cultivos *ex situ*

(fuera del sitio) y recolección de materiales genéticos de los principales centros de diversidad genética. Los fitomejoradores tienen fuertes esperanzas sobre estos recursos genéticos para el desarrollo convencional de variedades resistentes y de alto rendimiento. Sin embargo, los recursos económicos han limitado el rango de cultivos y regiones de las cuales es recolectado el material, dejando fuera de estas reservas *ex situ* mucha de la diversidad genética mundial de cultivos. El maíz, trigo, frijol, arroz y papa, han recibido la mayor atención, excluyendo gran cantidad de cultivos alimenticios mundiales. Un problema adicional es que estos esfuerzos de conservación genética *ex situ* remueven los cultivos de su contexto cultural-ecológico original, separando la relación adaptativa entre genoma y ambiente (Altieri *et al.* 1987, Oldfield y Alcorn 1987).

Para alcanzar la sostenibilidad, la conservación de los recursos genéticos debe realizarse también *in situ*, o en el lugar de la comunidad del cultivo (Wilkes 1991). La conservación *in situ* involucra un proceso dinámico de selección y cambio genético, más que de preservación estática. Esto permite que la selección ocurra, manteniendo y fortaleciendo las razas criollas. Esto tiende a imitar todas las condiciones - de localización, temporalidad y técnicas de cultivo - bajo las cuales se manejará el cultivar en el futuro. Como resultado los cultivares permanecen bien adaptados a (1) las condiciones naturales del ambiente local, (2) las condiciones culturales del ambiente local (como irrigación, labores culturales y fertilización), y (3) a todos los problemas bióticos localmente importantes para los cultivares (como plagas, enfermedades y arvenses).

La conservación *in situ* requiere que los productores y sus granjas sean depositarios, tanto de la información genética, como del conocimiento cultural de cómo los cultivos son cuidados y manejados. En un extremo, el principio de conservación *in situ* tenderá a que cada granja tenga su propio programa de mejoramiento y preservación. Realmente los productores deberían ser capaces de seleccionar y preservar sus propias variedades localmente adaptadas cuando sea factible. Sin embargo, un enfoque más práctico podría centrarse a nivel regional. Debido a que las características de una región agrícola establecen criterios importantes de selección, los programas de mejoramiento pueden ser centralizados considerando cierta amplitud geográfica y ecológica particular en una región,

CUADRO 14.1 Recursos genéticos y procesos importantes en la agricultura sostenible

Recurso o proceso	Ventaja para la sostenibilidad
Amplia base genética representada por muchas variedades locales y desarrolladas	Reduce la vulnerabilidad genética; permite la continuidad de la variación genética
Frecuencia variable de genes dentro y entre variedades locales	Reduce la vulnerabilidad genética
Flujos de genes dentro y entre variedades locales, ocasionalmente con plantas silvestres relacionadas	Mantenimiento de la variabilidad, diversidad y resistencia ambiental
Selección para diversidad de adaptaciones locales	Mantenimiento local de la flexibilidad con resistencia ambiental
Poblaciones relativamente pequeñas	Promueve la diversidad debido a una tendencia de cambio en el tiempo por el aislamiento de una población genética
Sistemas de mejoramiento con polinización abierta	Promueve la polinización abierta y mantiene la variabilidad
Ciclos de vida más largos	Promueve la polinización abierta
Distribución regional en parches	Promueve la diversidad
Presencia de las plantas silvestres relacionadas	Puede llevar a hibridación espontánea y variación
Mejoramiento local	Promueve la diversidad y adaptabilidad, manteniendo la resistencia ambiental
Condiciones flexibles y condiciones ambientales diversas en la granja (por ejemplo, cultivos intercalados)	Promueve micrositios para la retención de líneas genéticas variables
Alta diversidad en el agroecosistema	Favorece la interacción y desarrollo de interdependencias más complejas y coevolución

Adaptado de Salick & Merrick (1990).

tan amplia como se presenten cambios de material genético de los cultivos entre los productores de la región (Altieri y Montecinos 1993).

Finalmente, los esfuerzos para la conservación *in situ* y *ex situ* de recursos genéticos deben ser integrados. La asociación de grupos sin fines de lucro y productores muestran que las dos clases de programas pueden ser complementarias entre sí, promoviendo de manera más equitativa y eficaz la conservación. Por ejemplo, la Organización Native Seeds/SEARCH de Tucson, Arizona, complementa sus actividades de recolección y conservación de semillas *ex situ* incentivando a los productores para que siembren sus variedades de cultivos locales y tradicionales. Para lo cual la organización provee de semillas a los productores que han perdido variedades, adquiriendo posteriormente sus excedentes de producción. Con lo cual, los productores en sus propias parcelas logran, tanto retener los recursos genéticos tradicionales, como la selección en sus tierras para las variedades del futuro. Cuando en el campo se incorpora el conocimiento lo-

cal, los recursos locales y limitados insumos industriales, se puede lograr el mejoramiento para la sostenibilidad (Nabhan 1989).

Conservación de Cultivos Menores y Recursos no Agrícolas

Los recursos genéticos en los agroecosistemas van más allá de las relativamente pocas especies de cultivos que actualmente proveen el volumen de alimentos consumidos por la mayoría de la población humana. Cultivos menores o cultivos subutilizados, así como otras especies con potencial como nuevos cultivos son localmente importantes; todos forman parte de los recursos genéticos disponibles para programas de mejoramiento para la agricultura sostenible. Ellos también forman parte del proceso de resistencia horizontal del sistema como un todo, que es esencial para mantener las bases genéticas para los sistemas agrícolas sostenibles. Por lo que es importante ampliar los esfuerzos de conservación genética

incluir todos estos otros tipos de cultivos, especies no cultivadas y las especies silvestres relacionadas. Este objetivo se puede lograr mediante la preservación de los agroecosistemas tradicionales en los que estas especies están presentes (Altieri *et al.* 1987).

Conclusiones

La creciente preocupación de los impactos negativos que los insumos externos humanos tienen en la sostenibilidad de los agroecosistemas, acompañado con regulaciones que limitan los tipos de insumos que los productores pueden usar, está provocando un nuevo interés en restituir a los cultivos su capacidad de defensa y resistencia. Esto puede provocar cambios en las bases genéticas de las adaptaciones, pero también podemos cambiar el contexto ambiental. Si continuamos sembrando grandes áreas con monocultivos y nos enfocamos solo sobre la resistencia a un problema o estrés particular, sin determinar en primera instancia por qué ocurren estos problemas en el agroecosistema, se continuará seleccionando para muchos problemas que estamos tratando de evitar.

La meta de la agroecología es aplicar el conocimiento ecológico al diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles. De manera que si nosotros pretendemos lograr esta meta, necesitamos ampliar el contexto de nuestros esfuerzos de mejoramiento genético vegetal, de manera que esto funcione en los múltiples niveles del sistema de la granja. Necesitamos reducir la vulnerabilidad y dependencia de la interferencia humana, mediante una estrategia de diversificación del paisaje agrícola, de las especies de cultivos en los agroecosistemas, de la composición de variedades dentro de las especies de cultivos y la diversificación de los mecanismos de resistencia entre variedades. De otra forma, terminaremos trabajando sobre los procedimientos rutinarios de los fitomejoradores, que intentan estar un pequeño paso adelante de los problemas creados por el gran número de sistemas que hemos diseñado.

Ideas para Meditar

1. ¿Cuáles son las similitudes y diferencias entre el mutualismo obligado en un ecosistema natural y las relaciones entre los humanos y sus organismos domesticados?

2. ¿Qué podemos aprender de los sistemas agrícolas tradicionales de los países en desarrollo y la aplicación de la selección dirigida para promover la sostenibilidad?
3. ¿Cuáles son las debilidades de un programa de preservación de germoplasma que se centra solamente en cultivos clave y el acopio de material genético en grandes bancos de germoplasma con ambiente controlado, aislados de las condiciones de campo?
4. ¿Cómo presionan sus preferencias personales, al comprar en el mercado, sobre la selección del material genético usado por los productores?
5. ¿Cuál es el significado de la "selección agroecosistémica" en el proceso de selección dirigida?

Lecturas Recomendadas

American Chemical Society. 1995. *Biotechnology Information Pamphlet*. ACS Department of Government Relations and Science Policy. Washington, D.C.

Una revisión condensada en el campo de la biotecnología, los procesos básicos, aplicaciones potenciales y lo concerniente a seguridad y ética.

Bains, W. 1993. *Biotechnology from A to Z*. Oxford University Press: New York.

Una introducción al campo de la biotecnología en todas sus formas y enfoques.

Doyle, J. 1985. *Altered Harvest: Agriculture, Genetics, and the Fate of the World's Food Supply*. Viking Penguin: New York.

Una revisión de los factores económicos y sociales que han provocado que el énfasis de la diversidad genética sea el incremento en la producción mediante insumos químicos, limitando el acceso a semillas para los productores de todo el mundo.

Endler, J.A. 1986. *Natural Selection in the Wild*. Princeton University Press: Princeton, NJ.

El estudio de los procesos evolutivos en ecosistemas naturales.

Gliessman, S.R. 1993. Managing diversity in traditional agroecosystems of tropical México. En Potter, C.S., J.I. Cohen, and D. Janczewski (eds.), *Perspec-*

- tives on Biodiversity: Cases Studies of Genetic Resource Conservation and Development.* American Association for the Advancement of Science Press: Washington, D.C. pp. 65-74.
Un ejemplo de cómo la diversidad es manejada en ambientes agrícolas, que van desde un campo específico hasta el paisaje agrícola-natural.
- Gussow, J.D. 1991. *Chicken Little, Tomato Sauce and Agriculture: Who Will Produce Tomorrow's Food?* The Bootstrap Press: New York.
Una visión crítica de muchos de los problemas y riesgos inherentes a los programas modernos de mejoramiento genético y biotecnología en la agricultura actual.
- Myers, N. 1983. *A Wealth of Wild Species: Storehouse for Human Welfare.* Westview Press: Boulder, Colorado. pp. 13-88.
Una excelente presentación de por qué la biodiversidad resulta importante para los seres humanos.
- National Academy of Sciences. 1972. *Genetic Vulnerability of Major Crops.* National Academy Press: Washington, D.C.
Una de las primeras evidencias sobre los riesgos potenciales de la reducción del pool genético de nuestras principales variedades de cultivos.
- National Academy of Sciences. 1975. *Underexploited Tropical Plants with Promising Economic Value.* National Academy of Sciences: Washington, D.C.
Una revisión del valor potencial y papel de las especies de cultivos menores, especialmente de aquellas usadas por pequeños productores, o por productores con recursos limitados.
- Pluckett, D.L., N. Smith, J. Willians, and N. Anisletty. 1987. *Gene Banks and the World's Food.* Princeton University Press: Princeton, NJ.
Una panorámica de las fortalezas y debilidades de los bancos de genes como un medio para preservar los recursos genéticos agrícolas.
- Rissler, J. And M. Mellon. 1993. *Perils Amidst the Promise: Ecological Risks of Transgenic Crops in a Global Market.* Union of Concerned Scientists: Cambridge, MA.
Una fuerte crítica de los riesgos involucrados con el uso de cultivos creados por ingeniería genética.
- Silvertown, J. 1987. *Introduction to Plant Population Ecology.* Longman: New York.
Los fundamentos de genética vegetal, presentados desde una perspectiva de ecología de poblaciones.
- Simmonds, N.W. 1979. *Principles of Crop Improvement.* Longman: London.
Una revisión completa de la genética y el mejoramiento de cultivos.
- Simpson, B.B. and M.C. Ogorzaly. 1995. *Economic Botany: Plants in Our World.* McGraw Hill, Inc.: New York.
Una revisión completa y bien ilustrada que comprende las plantas útiles del mundo, incluyendo aspectos de su historia, morfología, taxonomía, química y usos modernos.
- Smith, B.D. 1995. *The Emergence of Agriculture.* Scientific American Library; A division of HPHLP: New York.
Una de las mejores fuentes de información sobre domesticación de plantas de cultivo y el origen de la agricultura.

INTERACCIONES DE ESPECIES EN COMUNIDADES DE CULTIVOS

Desde el punto de vista ecológico, un cultivo es una comunidad formada por un complejo de poblaciones de arvenses, cultivos, insectos y microorganismos que interactúan entre sí. Las interacciones entre las poblaciones de un agroecosistema que surgen de diferentes formas de interferencia, confieren a la comunidad ciertas características emergentes. Estas cualidades emergentes no se explican en términos de las propiedades de individuos o poblaciones sino que son el resultado de las interacciones. Tanto en ecosistemas como agroecosistemas, las características de la comunidad son de vital importancia en la estabilidad, productividad y dinámica funcional del sistema.

La investigación en sistemas agrícolas, generalmente se ha enfocado a estudios de las poblaciones de cultivos como la parte central del sistema de producción y no en la comunidad de la que forma parte el cultivo. Debido a este enfoque reduccionista, no se han entendido los sistemas de cultivo como comunidades y por lo tanto, se ha perdido la oportunidad de utilizar las características emergentes de las comunidades, o de manejar las interacciones interespecíficas para mejorar los sistemas de cultivo.

Un ejemplo de como la agricultura convencional es reduccionista es que no considera las interacciones que afectan a los cultivos, sino que pone especial atención a los efectos negativos que causan las arvenses, plagas y enfermedades, por lo que se ha tratado de eliminar a estas poblaciones. Se dice que las arvenses compiten con los cultivos y reducen la producción, por lo que deben ser eliminadas de los sistemas de cultivos. Otro ejemplo es la gran cantidad de investigación realizada para determinar las densidades óptimas de los cultivos (usualmente sembrados en monocultivo) minimizando la competencia intra-específica y maximizando la producción.

INTERFERENCIA A NIVEL DE COMUNIDAD

Las bases para el entendimiento de las interacciones entre especies, en el contexto de la estructura y función de la comunidad, están desarrolladas en el Capítulo 11. En este capítulo se discute cómo las interacciones entre organismos se pueden conceptualizar como interferencias, mediante las cuales los organismos causan un impacto en el ambiente, lo cual afecta a otros organismos. Se identifican dos tipos de interferencias: las de remoción de recursos, las cuales consisten en la remoción de algún recurso por parte de uno o varios organismos, y las interferencias de adición, en las que uno o varios organismos añaden alguna sustancia o estructura al ambiente. Cualquier tipo de interferencia puede tener efectos benéficos, neutrales o nocivos sobre otros organismos vecinos. Como se discutió en el Capítulo 11, la ventaja del concepto de interferencia es que permite un entendimiento más completo de los mecanismos de interacción.

En una comunidad existen muchas poblaciones, por lo que pueden existir muchos tipos de interferencias al mismo tiempo. Estas interferencias pueden interactuar y modificarse, creando relaciones complejas entre los miembros de la comunidad. A pesar de esta complejidad, podemos entender los tipos específicos de interferencia que existen entre las poblaciones y el efecto general del complejo de interferencias en la comunidad como un todo, pues el concepto de interferencia nos permite el análisis de los mecanismos de interacción.

Algunas formas en las que pueden combinarse y afectar a los cultivos se describen en la Figura 15.1. La remoción directa de algún recurso del medio conduce a interacciones tales como: competencia o herbivorismo; mientras que la adición de sustancias puede ocasionar interferencia alelopática, o la producción de

alimento para organismos benéficos en la comunidad agrícola. Ambos tipos de interferencia: adición y remoción pueden ocurrir simultáneamente, ocasionando diversos tipos de interacciones. Por ejemplo, muchos mutualismos surgen de la combinación de interferencia adición/remoción. Algunos ejemplos son la polinización (remueve néctar y adiciona polen) y la fijación biológica de nitrógeno (adición de nitrógeno fijado por la bacteria y remoción del nitrógeno por la leguminosa). Además, la combinación de interferencias adición/remoción entre las poblaciones, puede modificar las condiciones microclimáticas de un agroecosistema y afectar las poblaciones de otras especies. La sombra puede causar diversas modificaciones, insulación del suelo, cambios en la temperatura y el viento alteran las relaciones de humedad, y la combinación puede crear un microclima que favorezca la presencia de organismos benéficos en los agroecosistemas.

Complejidad de las Interacciones

Las formas mediante las cuales varias poblaciones de una comunidad agrícola tienen influencia en toda la comunidad a través de interferencias pueden ser muy complejas y difíciles de distinguir. El siguiente ejemplo nos ayuda a ilustrar este punto.

El desarrollo del dosel en el tiempo fue estudiado en un cultivo mixto de pasto y trébol. Los resultados de este estudio se presentan en la Figura 15.2. Cuando la interacción entre el pasto y el trébol se evalúa sin considerar el nitrógeno adicionado, parecería que se establece la competencia por luz bajo el dosel del cultivo mixto. La sombra del trébol parece inhibir el pasto. De acuerdo con estos datos podemos concluir que debido al mutualismo con las bacterias fijadoras de nitrógeno, el trébol es capaz de evitar la competencia por nitrógeno y ser la especie dominante. Sin embargo, los datos obtenidos cuando se agregan diferentes cantidades de nitrógeno como fertilizante al cultivo mixto, muestran diferentes resultados y la dinámica es dependiente de la disponibilidad de nitrógeno (Figura 15.2). La especie dominante depende de la cantidad de nitrógeno aplicado: en la última fecha de muestreo en el cultivo mixto con bajos niveles de nitrógeno el trébol es dominante, pero cuando los niveles de nitrógeno son altos el pasto es el dominante. La ventaja de un cultivo sobre el otro se altera por la disponibilidad de este macronutriente, siendo el



FIGURA 15.1
Formas de interferencia e interacciones entre especies en una comunidad.

pasto el dominante cuando se incrementa el nitrógeno. Los datos nos conducen a conclusiones diferentes tales como: quizás la competencia por luz es un elemento clave o a lo mejor, alguna interacción compleja de luz, disponibilidad de nitrógeno y algún otro factor (ejemplo aleloquímicos adicionados al suelo por el pasto) están interactuando en el cultivo mixto.

Sin embargo, de este estudio surgen diversas preguntas tales como: ¿Qué ocurriría en un cultivo mixto donde las dos especies involucradas tienen necesidades similares de nitrógeno y las mismas habilidades para obtenerlo? Bajo condiciones de fuentes de nitrógeno limitadas, quizás habría competencia y ambas especies se verían afectadas negativamente, pero eventualmente una de ellas sería la dominante. Sin embargo, son posibles otros escenarios. Las dos especies diferentes podrían tener formas complementarias para utilizar el nitrógeno cuando se encuentra en cantidades limitadas: estar desfasados en períodos de crecimiento, o poseer sistemas radiculares diferentes que utilicen los nutrientes del suelo en diferentes horizontes. Estas especies podrían evitar la competencia y coexistir en el mismo sistema.

Coexistencia

En comunidades naturales complejas, las poblaciones de organismos similares frecuentemente comparten el mismo hábitat sin una interferencia competitiva aparente, aunque exista traslape en sus nichos. De igual forma, frecuentemente ocurre en

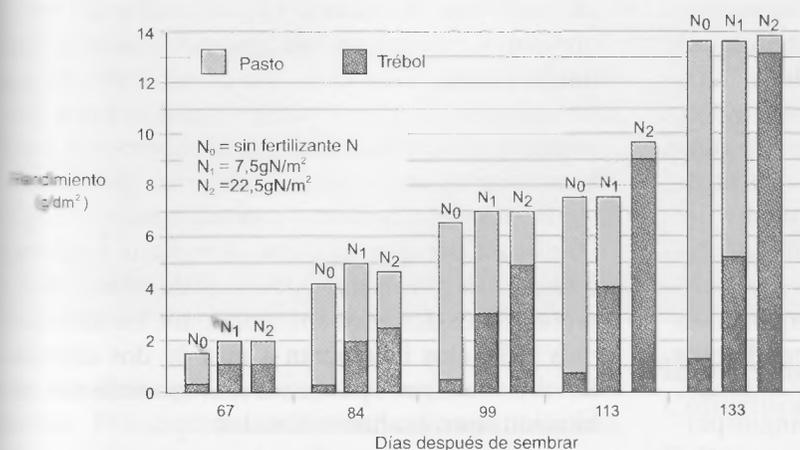


FIGURA 15.2

Dominancia relativa del pasto (*Lolium rigidum*) y el trébol (*Trifolium subterraneum*) en relación con diferentes niveles de fertilización con nitrógeno.

Fuente: Stern & Donald (1961).

las comunidades naturales que más de una especie es dominante. Aparentemente parecería que el principio de exclusión competitiva, que propone que dos especies con similares necesidades no pueden ocupar el mismo nicho o hábitat, no se aplica comúnmente en muchas comunidades.

La habilidad de "evadir" la competencia y coexistir en comunidades mixtas, muestra ventajas para todos los organismos involucrados. Por lo tanto, esta habilidad quizá provea de ventajas de selección significativas desde el punto de vista evolutivo. A pesar de que la selección por habilidad competitiva ha jugado un papel muy importante en la evolución, los ecólogos reconocen la idea de que la habilidad para coexistir sea una regla más que una excepción (den Boer 1986).

También es posible que muchas de las especies domesticadas han sido seleccionadas debido a que pueden coexistir en cultivos mixtos, debido a que han sido sembradas en policultivos durante miles de años. En este contexto, las plantas han coevolucionado, cada una desarrollando adaptaciones que les permiten coexistir. El policultivo tradicional maíz-frijol-cucurbita que se discute más adelante en este capítulo es un ejemplo.

Las poblaciones mixtas son capaces de coexistir debido a variados mecanismos como: repartición de

los recursos, diversificación de nichos, cambios fisiológicos, conductuales o genéticos que reducen la competencia. El entendimiento de los mecanismos de interferencia que hacen posible la coexistencia, podrían ser fundamentales para considerarlos en el diseño de agroecosistemas con cultivos múltiples.

En los agroecosistemas, la combinación de especies con características fisiológicas o recursos necesarios ligeramente distintos, son formas muy importantes de permitir la coexistencia de especies en cultivos múltiples. La estrategia de diseñar comunidades agrícolas mixtas, tiene más potencial que el continuar tratando de mantener monocultivos, donde gran parte de la intervención humana está encaminada a evitar la interferencia: competencia con arvenses, herbivorismo, plagas de insectos, etc. Los policultivos tradicionales de las diferentes regiones

del mundo, ofrecen escenarios muy interesantes para realizar investigación que conduzca al diseño de sistemas que eviten la competencia y/o promuevan la coexistencia.

Mutualismos

Las especies con alguna interacción mutualista, además de coexistir, son dependientes una de la otra para lograr su desarrollo óptimo. Los mutualismos son quizás el resultado de la coexistencia entre especies que continúan evolucionando en la misma dirección, adaptaciones coevolutivas para lograr un beneficio mutuo a través de una asociación cercana. Actualmente los ecólogos reconocen que las relaciones mutualistas entre organismos de diferentes especies son relativamente comunes en comunidades naturales complejas, creando intrínsecas interdependencias entre los miembros de la comunidad. Su preponderancia es otro factor que explica la diversidad y complejidad observada en muchas comunidades y sus redes tróficas. Durante la domesticación han ocurrido procesos de coevolución semejantes, quizás debido a la selección humana, o se han establecido en el contexto del manejo de cultivos múltiples. Los tipos de mutualismos más comunes son los siguientes:

- **Mutualismos habitacionales.** Uno de los organismos vive parcial o totalmente dentro del otro. Un ejemplo clásico es la interacción entre la bacteria *Rhizobium* y las leguminosas. En esta interacción, el nitrógeno fijado por la bacteria sólo actúa dentro de los nódulos que se forman en las raíces de las plantas. Este mutualismo ha sido la piedra angular de muchos sistemas de producción alrededor del mundo.
- **Mutualismos no-habitacionales.** Los organismos involucrados son relativamente independientes físicamente, pero tienen interacciones directas. Un ejemplo es la interacción entre las angiospermas y sus polinizadores. Muchos cultivos no tienen la capacidad de producir semillas fértiles si no son polinizados por abejas, por otra parte las abejas son dependientes de los cultivos, ya que éstos son sus principales fuentes de néctar y/o polen.
- **Mutualismos indirectos.** Las interacciones entre un grupo de especies modifican y mantienen el medio en que éstas viven. Un ejemplo común son los policultivos. Una especie vegetal de porte alto puede modificar las condiciones microclimáticas y beneficiar el establecimiento de un cultivo asociado, la presencia de ciertos cultivos atrae a artrópodos benéficos que facilitan el manejo y control biológico de plagas potenciales. A diferencia de los mutualismos descritos anteriormente, los mutualismos indirectos involucran a más de dos especies. Estos mutualismos pueden incluir mutualismos habitacionales o no-habitacionales.

Algunos mutualismos son obligatorios para los organismos involucrados, mientras que en otros, sólo uno de los organismos es dependiente de la interacción. Otros son los mutualismos facultativos, en éstos los organismos son capaces de vivir aún sin la interac-

TEMA ESPECIAL

La Historia del Estudio del Mutualismo

La idea de que los organismos se relacionan en formas mutualísticas benéficas tiene una larga historia (Boucher 1985). Los antiguos griegos y romanos reconocieron que la naturaleza estaba llena de ejemplos de plantas y animales que se beneficiaban unos a otros. El historiador Herodotus describe la interrelación entre el chorlito y el cocodrilo. El pájaro ayuda al cocodrilo quitándole y comiéndole las sanguijuelas de la boca de éste, y el cocodrilo no daña el ave a pesar de que podría ser una presa fácil.

En los años 1600, la teoría de la teología natural promovía que los animales y plantas eran "desinteresados", se ayudaban unos a otros de acuerdo con el orden natural de las cosas. Se creía que la Divina Providencia daba a cada organismo un papel específico que jugar en la "sociedad" del mundo natural y algunos organismos tenían el papel de guardianes o ayudantes.

Con el progreso de la Revolución Industrial, durante los siglos XVIII y XIX, la idea de la competencia entre organismos fue la fuerza directriz en la naturaleza y ganó relevancia en la ciencia. La pu-

blicación de Charles Darwin "*El Origen de las Especies*" fue clave y dio énfasis a la competencia, pues proponía que en la lucha por la "sobrevivencia" la competencia era la presión selectiva primaria en el proceso evolutivo. Las interpretaciones y popularización del trabajo de Darwin fue aún más allá, considerando a la naturaleza como "roja por la sangre en las garras y dientes".

Muy pronto después de la publicación de "*El Origen de las Especies*", el interés en el concepto del mutualismo fue revivido. El término lo propuso en 1873 Pierre Van Beneden, en una conferencia dirigida a la Real Academia de Bélgica, y en 1877 la tesis doctoral de Alfred Espina documentó múltiples ejemplos de mutualismos. Después, en un artículo importante publicado en 1893, Roscoe Pound finalmente cuestionó la noción romántica del mutualismo, como una ayuda facilitada gratuitamente y en forma altruista entre organismos, explicando que cada organismo en el mutualismo actúa simplemente por su propio interés. El chorlito por ejemplo, obtiene alimento y el cocodrilo es desparasitado. El hecho de que tal interacción sea mutuamente benéfica la hace un mutualismo; la intención individual del organismo es irrelevante.

Conforme fue desarrollándose la ecología como una de las ciencias importantes del siglo XX, el interés por los mutualismos se mantuvo vigente en esta disciplina, concentrándose la mayoría de la investigación a nivel de la comunidad y enfocándose en la competencia. El mutualismo no surge como concepto importante sino hasta 1970.

Los mutualismos han sido históricamente importantes en la agricultura, la cual en sí misma puede

verse como un mutualismo obligado entre la humanidad y las plantas domesticadas. Los agroecosistemas tradicionales se han desarrollado alrededor de un mutualismo benéfico entre *Rhizobium*-leguminosa (es descrito en el siguiente capítulo), y coordinando las influencias de insectos benéficos y especies no cultivadas. La agricultura convencional tiende a eliminar todas estas interrelaciones benéficas y las reemplaza con insumos.

Sin embargo, se desarrollan mejor cuando interactúan. Frecuentemente, los mutualismos funcionan no sólo por estímulos benéficos directos para los organismos involucrados, sino porque ayudan a las especies a prevenir impactos negativos.

La expansión de la teoría de mutualismo en ecología ha empezado a tener aplicaciones en el desarrollo de agroecosistemas con varios cultivos, en los que las interacciones mutualistas pueden suceder. El logro de que estas interacciones sean parte integral de las comunidades agrícolas, es la clave para establecer sistemas sostenibles que requieran de pocos insumos externos al sistema o de menor intervención humana.

Por su contribución al establecimiento de interacciones benéficas, los mutualismos en los agroecosistemas incrementan la resistencia del sistema a los impactos negativos de las plagas y enfermedades. Al mismo tiempo, se mejora la eficiencia de la fijación de energía solar, la captura de nutrimentos y su reciclaje en el sistema. Siempre que las interacciones mutualistas se puedan incorporar en el establecimiento y organización de las comunidades agrícolas, la sostenibilidad será más fácil de alcanzar y mantener.

INTERFERENCIAS MUTUALISTAS BENÉFICAS EN LOS AGROECOSISTEMAS

Si analizamos a los agroecosistemas tradicionales, muchos de ellos involucran interacciones benéficas en toda la comunidad. Agroecosistemas similares han sido desarrollados, sin investigación agroecológica y experimentación práctica, por los agricultores. Esos sistemas están basados en la combinación de varias especies cultivadas y arvenses; incluyendo cultivos de cobertura, arvenses con cultivos y policultivos, que favorecen el establecimiento de interacciones mutualistas.

Interferencias Benéficas de los Cultivos de Cobertura

En una comunidad agrícola, los cultivos de cobertura son especies vegetales (usualmente pastos o leguminosas) que crecen en poblaciones puras o mixtas y que cubren el suelo durante parte o todo el año. Usualmente se siembran después de la cosecha del cultivo principal para cubrir el suelo durante la estación de barbecho, pero también se pueden sembrar en años alternativos con el cultivo principal o crecer en asociación. Los cultivos de cobertura estacionales se pueden incorporar al suelo mediante la labranza, o mantenerse como coberturas vivas o muertas en la superficie del suelo durante varias estaciones. Cuando los cultivos de cobertura se incorporan al suelo, la materia orgánica que se adiciona se denomina abono verde. Cuando estos cultivos son sembrados directamente en asociación con otros cultivos se llama cobertura viva.

Sin importar como son incorporados, los cultivos de cobertura tienen importantes impactos en la comunidad agrícola, y muchos de estos efectos son benéficos. Estos cultivos tienen la habilidad de modificar la interfase suelo-atmósfera, ofrecen protección física al suelo de la radiación solar, viento y lluvia; además de otras formas diversas de interferencia tanto de adición como de remoción de recursos. Algunos de los beneficios que los cultivos de cobertura ofrecen a los agroecosistemas, conocidos en la agricultura desde hace tiempo, incluyen: reducción de erosión, mejoran la estructura del suelo, mejoran la fertilidad y suprimen arvenses, insectos y algunos patógenos. Cuando los cultivos de cobertura logran los beneficios antes mencionados, se requiere de menor interferencia humana y se depende menos de insumos externos al sistema. El Cuadro 15.1 presenta



FIGURA 15.3
Cultivo de cobertura de haba
(Vicia faba) y centeno (Hordeum
vulgare), Watsonville, CA, EE.UU.
 Este cultivo de cobertura mixto
 inhibe el crecimiento de arvenses y
 cuando su biomasa se incorpora al
 suelo, adiciona materia orgánica y
 nitrógeno fijado.

muchos de los beneficios de los cultivos de cobertura, así como el tipo de interferencia que hacen posible los efectos benéficos.

A pesar de que los beneficios de los cultivos de cobertura son bien conocidos en general, su uso debe ser acorde con las características específicas de cada agroecosistema. El productor necesita conocer cómo el cultivo de cobertura va a interactuar con otros organismos del sistema, y cómo impactará en las condiciones microambientales. Adicionalmente, debemos recordar que los tipos de interferencia entre los componentes de una comunidad agrícola pueden ser benéficos en un tiempo y perjudiciales en otro. Si los recursos en el agroecosistema son limitados, el cultivo de cobertura puede presentar interferencia competitiva. Si se permite una densidad alta, algunos cultivos de cobertura pueden ser alelopáticos para el cultivo. Los residuos y productos de la descomposición de los cultivos de cobertura, al ser incorporados, pueden producir sustancias que inhiben los cultivos. Algunos herbívoros, insectos plaga o enfermedades pueden encontrar en ciertas especies de cultivos de cobertura un hospedante alternativo y después afectar el cultivo. Los residuos de los cultivos de cobertura también pueden interferir con prácticas de cultivo, deshierba, cosecha u otra labor agrícola. El estudio de caso que se presenta describe una investigación en la que se demostró la

habilidad de los cultivos de cobertura, especialmente de aquellos que se usan en sistemas mixtos para controlar arvenses e incrementar la producción del cultivo principal.

Interferencias Benéficas de las Arvenses

Las arvenses en los sistemas de cultivo generalmente son consideradas perjudiciales, ya que al competir con los cultivos reducen la producción. Aunque frecuentemente las arvenses tienen impactos negativos sobre los cultivos, se ha mostrado claramente que en muchas circunstancias éstas pueden ser benéficas en la comunidad agrícola (Radosevich y Holt 1984, Chacón y Gliessman 1982). Las arvenses muchas veces tienen impactos benéficos al igual que los cultivos de cobertura y frecuentemente pueden tener las mismas funciones ecológicas. Con un manejo apropiado basado en el entendimiento de los mecanismos de interferencia de las arvenses, los productores pueden manejar estas especies para su beneficio.

Modificación del Ambiente en el Sistema de Cultivo

Las arvenses pueden proteger la superficie del suelo de la erosión con sus raíces o su cubierta foliar, retener nutrientes que podrían ser lixiviados de

CUADRO 15.1 Beneficios potenciales de los cultivos de cobertura

	Interferencias	Beneficios para la comunidad de cultivos
Impactos en la Estructura del Suelo	Aumenta la penetración de las raíces en las capas superficiales; protege a la superficie del suelo de la radiación solar, viento e impacto físico de la lluvia; adición de materia orgánica al suelo; aumento de la actividad biológica en la zona radicular	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora la infiltración del agua • Reduce la formación de costras en el suelo • Reduce la escorrentía • Menor erosión del suelo • Mayor estabilidad de agregados del suelo • Incrementa el porcentaje de macroporos • Reduce la compactación del suelo • Reduce la densidad aparente
Impactos en la Fertilidad del Suelo	Creación de condiciones más frías y húmedas en la superficie y subsuelo; fijación de nitrógeno por las bacterias <i>Rhizobium</i> ; fijación de carbono (mayor biomasa); captura de nutrimentos por las raíces.	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento en la cantidad de materia orgánica • Retención de nutrimentos en el sistema • Prevención de pérdidas por lixiviación • Incremento en la cantidad de nitrógeno • Mayor biodiversidad de la biota benéfica en el suelo.
Impactos en los Organismos Plaga	Adición de compuestos alelopáticos; remoción de recursos (luz y nutrimentos) necesarios para las arvenses; se crea un hábitat adecuado para parásitos y parasitoides; modificación del microclima.	<ul style="list-style-type: none"> • Inhibición de arvenses por alelopatía • Supresión competitiva de las arvenses • Control de patógenos del suelo por aleloquímicos • Incremento en la presencia de organismos benéficos • Supresión de organismos plaga

Adaptado de Lal *et al.* (1991); Altieri (1995a).

ESTUDIO DE CASO

Cultivo de Cobertura con Centeno y Haba

Los sistemas de cultivos de cobertura con especies múltiples frecuentemente confieren mayores beneficios al agroecosistema que un solo cultivo de cobertura. Estos resultados surgen de las interacciones entre las mezclas de especies.

Uno de estos sistemas ha sido estudiado en la granja del Centro de Agroecología de la Universidad de California, Santa Cruz (UCSC). Una leguminosa (haba) se mezcla con el centeno como cultivo de cobertura para el invierno en las parcelas de hortalizas. Estos cultivos de cobertura han sido utilizados por los productores locales desde el inicio del Siglo XX. Los productores siembran la

mezcla de pasto-leguminosa después de la cosecha del verano, antes de iniciar las lluvias de invierno. Se dejan crecer durante los meses húmedos y fríos de invierno y se incorporan al suelo en marzo o inicios de abril. Las hortalizas son sembradas a finales de mayo. En el estudio que se realizó en UCSC se utilizó el repollo como hortaliza.

El centeno produce gran cantidad de biomasa e inhibe el crecimiento de las arvenses en las parcelas, posiblemente mediante compuestos alelopáticos (Putnam y DeFrank 1983). El haba adiciona nitrógeno al sistema por su relación simbiótica con bacterias fijadoras de nitrógeno, pero produce una cantidad limitada de biomasa y afecta poco las arvenses. Cuando se siembran juntos, el centeno y el haba, se combinan las ventajas de ambos: la mezcla suprime el crecimiento de arvenses, es muy

productiva y adiciona nitrógeno al sistema. Sin embargo, esto no es todo, la mezcla de estos cultivos de cobertura incrementa los niveles de nitrógeno en el suelo, aún más que cuando se siembra la leguminosa sola. Es posible que el incremento de la materia orgánica y su incorporación retarda la descomposición, reteniendo más nitrógeno en el suelo.

Esta mezcla de cultivos de cobertura también resulta ser benéfica para las hortalizas que se siem-

bran después. Aunque la producción de repollo fue mayor en el tratamiento con solo haba, no es estadísticamente diferente del tratamiento con la mezcla de los cultivos de cobertura, ambos fueron significativamente mayores que el tratamiento con sólo centeno y el testigo. Debido a la gran cantidad de materia orgánica que se adiciona al suelo por la mezcla de los cultivos de cobertura, probablemente se incrementen sus beneficios en el tiempo.

CUADRO 15.2 Impacto del haba (*Vicia faba*) y el cereal (*Secale cereale*) en varios factores del agroecosistema

Cultivo de Cobertura	Biomasa total, g/m ²			Biomasa de arvenses g/m ²		Rendimiento del col/repollo, kg/100m ²
	1985	1986	1987	1986	1987	1987
Haba	138	325	403	17,4	80,7	849,0
Centeno	502	696	671	0,7	9,7	327,8
Centeno/haba	464	692	448	0,3	3,9	718,0
Ninguno (Control)	n.d.	130	305	112,3	305,1	611,0

Fuente: Gliessman (1989).

sistema, adicionar materia orgánica al suelo e inhibir selectivamente el desarrollo de otras especies más nocivas por alelopatía. Muchas de las características ecológicas de las arvenses se pueden manejar para favorecer el agroecosistema, ya que son especies pioneras que invaden zonas perturbadas e inician el proceso de sucesión secundaria. La mayoría de las comunidades agrícolas, especialmente aquellas compuestas por especies anuales, representan hábitats simples y perturbados y a estas condiciones las arvenses están bien adaptadas. Cuando conocemos y entendemos las bases ecológicas de las interferencias de las especies de arvenses sobre los cultivos, podemos utilizarlas a favor de la comunidad agrícola y reducir la cantidad de insumos externos al agroecosistema.

Control de Insectos Plaga Mediante la Promoción de Insectos Benéficos

La agricultura ha tratado de eliminar las arvenses y los insectos plaga de los agroecosistemas. Para lograr lo anterior se requiere de grandes cantidades de insumos ajenos al sistema y no siempre se logran los resultados esperados. Si examinamos desde el punto de vista ecológico, las interacciones entre las arvenses y los insectos, podemos darnos cuenta que es posible controlar los insectos no deseables mediante el manejo de las arvenses. Existe suficiente literatura que apoya la hipótesis de que ciertas especies de arvenses pueden ser consideradas como componentes importantes de las comunidades agrícolas, debido a los efectos positivos que éstas pueden tener sobre las po-

ESTUDIO DE CASO

Cultivo de Cobertura de Mostaza para Manzanas Fuji

El uso de cultivos de cobertura para suprimir el crecimiento de arvenses puede contribuir a reducir la necesidad de herbicidas en un agroecosistema. Para que esto sea útil se requiere asegurar que inhiba las arvenses pero no al cultivo. La mostaza silvestre (*Brassica kaber*) parece cumplir estos requisitos si es sembrada en huertos frutícolas.

En un estudio de conversión de una granja convencional a manejo orgánico, de una plantación joven de árboles semi-enanos de manzana Fuji, de un estudiante de grado de la Universidad de California, Santa Cruz, se demostró el potencial de la mostaza como cultivo de cobertura (Paulus 1994). En este estudio se sembraron diferentes tipos de cultivos de cobertura entre árboles, en diferentes parcelas y se evaluó su efectividad para controlar arvenses. Los tratamientos con los cultivos de cobertura fueron comparados con el manejo convencional con herbicidas y una conversión a manejo orgánico utilizando plásticos para controlar las arvenses.

La mostaza fue el único cultivo de cobertura que controló las arvenses en forma similar al herbicida y al plástico. Cuarenta y cinco días después de emergida la mostaza, controló casi todas las otras arvenses de la parcela, representando el 99% de la biomasa de arvenses en las parcelas. Otros cultivos de cobertura que mostraron una dominancia parcial sobre las arvenses no tuvieron más del 42% de la biomasa total en las parcelas respectivas.

Parece ser que la mostaza alcanza estos niveles de dominancia por la interferencia alelopática. Se ha observado que muchas especies del género *Brassica*, incluyendo la mostaza, inhiben el crecimiento de arvenses en el campo y los estudios han mostrado que contienen aleloquímicos, denominados glucosinolatos, que en laboratorio han mostrado inhibición de la germinación de semillas (Gliessman 1987). Las semillas de monocotiledóneas, que frecuentemente son las principales arvenses, son las que presentaron la mayor inhibición.

Paulus encontró que la mostaza no sólo inhibe a las arvenses eficazmente, sino que también incre-

menta la producción de manzanas. Los árboles en las parcelas con la mostaza como cultivo de cobertura, produjeron tres veces más por árbol que los árboles en las parcelas convencionales. Los árboles que crecieron con la mostaza incrementaron su diámetro hasta 50% más rápidamente que los de parcelas convencionales, durante los dos años del estudio.

Al menos parte del aumento en la producción de las parcelas con la mostaza se debió a un mejoramiento en el reciclaje de nutrientes. Los análisis mostraron que las arvenses tomaron cantidades considerables de nitrógeno durante el invierno, bajando la concentración en el suelo. Cuando llegaron las lluvias de invierno, el nitrógeno en las parcelas sin el cultivo de cobertura se lixivió y se perdió del sistema, mientras que en las parcelas con los cultivos de cobertura, el nitrógeno fue inmobilizado en la biomasa de la arvense. Cuando la mostaza se incorporó al suelo en la primavera, el nitrógeno quedó disponible para uso de los árboles.



FIGURA 15.4

*Mostaza silvestre como cultivo de cobertura en un huerto de manzanas. La mostaza silvestre (*Brassica kaber*) adiciona una serie de interacciones en el agroecosistema de manzana, porque atrae insectos benéficos a sus flores e inhibe a otras arvenses mediante aleloquímicos.*



FIGURA 15.5

*Un cultivo de coliflor con borde de Spargula arvensis a su alrededor.
La flor de la arvensis atrae a insectos benéficos.*

blaciones de insectos benéficos (Altieri 1987). Dependiendo del tipo de insectos benéficos, las arvenses pueden modificar el microambiente en diversas formas y proveer un buen hábitat para éstos, ya que son fuentes alimenticias alternativas (néctar, polen, follaje o presas) (Altieri y Whitcom 1979).

En un experimento donde se plantaron bordes angostos (0.25 m) alrededor de parcelas de 5 x 5 m donde se sembraron coliflores, se encontró que la población de ciertos insectos plaga decreció, como resultado del fuerte incremento de depredadores y/o parásitos (Ruíz-Rosado 1984). Por ejemplo, con las arvenses *Spargula arvensis* y *Chenopodium album*, sembradas en los bordes que rodeaban las parcelas, las larvas y huevecillos de lepidópteros que son plagas importantes de las Brassicas: *Pieris rapae* y *Trichoplusia* ni fueron más parasitadas por taquínidos como *Madremyia saundersii*. Los taquínidos adultos son atraídos por las fuentes alimenticias que proveen las flores de las arvenses, encontrando en el cultivo cercano insectos hospedantes donde ovipositar.

En otro estudio con *Spargula arvensis*, sembrada en hileras de 1 m de ancho alrededor de un cultivo de col de Bruselas, la cantidad de organismos benéficos que controlaban a los áfidos recolectados en la parcela, aumentó en forma significativa cuando *S. arvensis*

inició su floración (Linn 1984). Probablemente, las flores proveen de néctar y polen a organismos benéficos. Además, tanto avispas depredadoras como parásitas y sírfidos fueron observados alimentándose de las flores de la arvensis. Muchos insectos benéficos se encontraron en los muestreos con redes que se realizaron en el cultivo de col de Bruselas, pero sólo hasta una distancia de 5 m desde el borde. En otros estudios, se encontraron reducciones significativas de las poblaciones de áfidos, cuando *Spargula* tenía una distribución regular en el cultivo (Theunissen y Daden 1980).

Cultivos Intercalados

Cuando dos o más cultivos se siembran juntos en la misma parcela, las interacciones que ocurren pueden tener efectos benéficos para ambas especies, y reducir considerablemente los insumos externos al sistema. Al respecto existe gran cantidad de información generada en años recientes, (Francis 1986) y algunos autores han discutido cómo la estrategia ecológica de cultivos múltiples ofrece un entendimiento de cómo se dan los beneficios (Hart 1984, 1986; Trenbath 1976, Beet 1982, Vandemeer 1989).

Los sistemas de cultivos intercalados más exitosos están en las regiones tropicales, donde un alto porcentaje de la producción agrícola aún se siembra en cultivos mixtos. Debido al limitado acceso que tienen los campesinos a los agroquímicos, ellos han desarrollado sistemas agrícolas de bajos insumos externos a sus sistemas (Gliessman et al. 1981, Altieri y Anderson 1986).

El policultivo tradicional maíz-frijol-cucurbita de América Central y México, que se practica desde la época prehispánica, ha sido estudiado en detalle. Ambas interferencias, de adición y remoción, ocurren en el sistema provocando modificaciones del hábitat e interacciones benéficas para los tres cultivos.

En una serie de experimentos sobre maíz-frijol-cucurbita, realizados en Tabasco, México, se mostró que la producción de maíz puede ser hasta un 50% más alta que la de maíz en monocultivo, cuando se



FIGURA 15.6

El sistema tradicional de cultivo intercalado de maíz-frijol-cucurbita de Mesoamérica. Las interacciones complejas entre especies son clave para el éxito de este sistema de cultivos.

sembraba con el frijol y cucurbita usando la tecnología de los campesinos de la región, y sembrando en parcelas que únicamente habían sido manejadas usando las prácticas tradicionales (Amador y Gliessman 1990). Hubo una reducción significativa de la producción para los dos cultivos asociados, pero el total de la producción, considerando los tres cultivos, fue mayor que la obtenida en un área equivalente sembrada con monocultivos de cada uno de los tres cultivos. Como se muestra en el Cuadro 15.3, esta comparación se realizó utilizando el concepto de uso equivalente de la tierra, que se explica detalladamente en el Capítulo 16. Una relación equivalente mayor a 1 indica que en el cultivo mixto hay sobrendimiento, en relación con el monocultivo de sus componentes.

Además, la investigación ha identificado algunos mecanismos ecológicos que explican estos incrementos:

- En un policultivo con maíz, el frijol nodula más y estos nódulos son potencialmente más activos para fijar nitrógeno (Boucher y Espinosa 1982).
- El nitrógeno fijado está directamente disponible al maíz, a través de las micorrizas que se interrelacionan entre los sistemas radicales de ambas especies (Bethlenfalvay et al. 1991).
- A pesar de que se remueve nitrógeno con la cosecha, se han observado ganancias netas en el suelo cuando se asocian los cultivos (Gliessman 1982).
- La cucurbita ayuda en el control de arvenses: las hojas anchas y gruesas y su disposición horizontal a la superficie bloquea la luz, previniendo la germinación y crecimiento, además de que las hojas contienen compuestos alelopáticos que pueden ser lixiviados con las lluvias e inhibir las arvenses (Gliessman 1983).
- Los insectos herbívoros están en desventaja en el policultivo, debido a que hay menor concentración de su alimento y es más difícil encontrar sus fuentes alimenticias cuando están mezcladas (Risch 1980).
- La presencia de insectos benéficos es mayor debido a que se promueven por las condiciones microclimáticas que se establecen y la presencia de diversas fuentes de polen y néctar (Letourneau 1986).

Sorprendentemente, cuando las mismas variedades de maíz, frijol y cucurbita se plantaron simultáneamente y con las prácticas tradicionales, en una parcela cercana que tenía al menos 10 años de estar siendo utilizada con maquinaria para preparar el suelo, fertilizantes químicos y plaguicidas no hubo ganancias en la producción. Aparentemente, las interacciones positivas que ocurren en una parcela que se ha manejado en forma tradicional, fueron inhibidas por alguna alteración en el ecosistema suelo que ocurren por las prácticas agrícolas convencionales. Este resultado muestra que existe un enlace muy importante entre las prácticas culturales y las condiciones ecológicas específicas.

El policultivo frijol-maíz-cucurbita es sólo una de las muchas combinaciones de cultivos que existen o se pueden establecer. Los conocimientos sobre los meca-

CUADRO 15.3 Rendimiento de un policultivo de maíz-frijol-cucurbita comparado con los rendimientos de los mismos cultivos en monocultivos en Tabasco, México

	Monocultivo de baja densidad*	Monocultivo de alta densidad*	Policultivo
Densidad de maíz (plantas/ha)	40,000	66,000	50,000
Rendimiento del maíz (kg/ha)**	1,150	1,230	1,720
Densidad del frijol (plantas/ha)	64,000	100,000	40,000
Rendimiento de frijol (kg/ha)**	740	610	110
Densidad de calabaza (plantas/ha)	1,875	7,500	3,330
Rendimiento de la calabaza (kg/ha)	250	430	80
Uso Equivalente de la Tierra (UET)			1.97a 1.77b

* Las densidades de los monocultivos fueron diseñadas para representar niveles un poco arriba y debajo de las densidades normales de siembra para monocultivos.

**Rendimientos de maíz y frijol expresados como grano seco, calabaza como fruta fresca.

^a Comparado con monocultivo de baja densidad

^b Comparado con monocultivo de alta densidad

Fuente: Amador (1980).

nismos de interferencia que se presentan en esta comunidad agrícola, proveen un ejemplo de lo que se puede observar al estudiar otros cultivos mixtos.

Existe gran número de policultivos que reflejan la amplia variedad de cultivos y prácticas de manejo, que los productores de diferentes lugares utilizan para obtener lo necesario para cubrir sus necesidades básicas: alimento, fibra, forraje, combustible, dinero en efectivo, etc. Los cultivos intercalados pueden incluir mezclas de cultivos anuales, anuales con perennes o mezclas de perennes. Las leguminosas pueden asociarse a diferentes cereales y las hortalizas pueden sembrarse entre hileras de árboles frutales. El patrón de plantación de estas mezclas puede variar de hileras alternadas entre dos cultivos, hasta arreglos muy com-

plejos de cultivos anuales, arbustos y árboles, como se pueden encontrar en los huertos familiares (Capítulo 17). La siembra y la cosecha de los policultivos se puede distribuir en el espacio y el tiempo, de tal forma que provean ventajas al productor durante el año. La incorporación de animales a los sistemas de producción ayuda aún más a la integración de las comunidades de cultivos mixtos. El entendimiento de los fundamentos ecológicos de las interacciones que se dan en estas comunidades, es la clave para promover y revalorar el uso de policultivos en la agricultura.

APROVECHAMIENTO DE LAS INTERACCIONES DE ESPECIES PARA LA SOSTENIBILIDAD

En los sistemas naturales, los organismos están en comunidades mixtas de especies. El entendimiento de la complejidad de las interacciones que se presentan en estas mezclas, muestra la necesidad y conveniencia de enfocarnos en cada uno de los cuatro niveles de organización. El nivel de ecología de comunidades que se discute en este Capítulo, se basa en el entendimiento del nivel de los organismos individuales y de las poblaciones. A nivel comunitario, emergen cualidades únicas que resultan de las interacciones multiespecíficas. Estas cualidades emergentes son muy importantes a nivel de ecosistema, como se verá en los siguientes capítulos.

El reto para los agroecólogos, es utilizar el entendimiento de las interacciones a nivel comunitario en el contexto de la sostenibilidad. Es importante que se combine el conocimiento de la ecología y manejo de especies individuales que poseen los agrónomos, con el conocimiento sobre interacciones y procesos que ocurren a nivel comunitario que poseen los ecólogos. Es tiempo de redirigir una gran proporción de los recursos que han sido generados por el conocimiento de los monocultivos, hacia la integración del conocimiento agronómico y ecológico y así, ampliar los objetivos de desarrollo y tener habilidad para manejar comunidades enteras en las que interactúan diversos organismos, ambos cultivos y arvenses, y entender cómo contribuye cada una de las especies a la sostenibilidad del sistema. Este es un

proceso extremadamente complejo que requiere un enfoque de sistemas y la interacción de muchas disciplinas, pero el resultado final será un mejor entendimiento de cómo se debe dar un cambio eficaz en la agricultura para tener un desarrollo sostenible.

Ideas para Meditar

1. ¿Cuáles son los impedimentos principales para convencer a los agricultores convencionales de las ventajas potenciales de manejar sistemas complejos y de varias especies?
2. ¿Cuál es un ejemplo de una comunidad compleja de cultivos, donde la competencia y los mutualismos juegan papeles diferentes pero igualmente importantes en el éxito del sistema completo?
3. Describa un ejemplo de cómo la coexistencia y los mutualismos, dentro de una comunidad de cultivos, pueden ser esenciales para el éxito de un mecanismo de control biológico para un insecto plaga particular.
4. Un organismo no cultivado puede tener impactos negativos o positivos en el resto de la comunidad de cultivos de la cual es miembro. Explique cómo es esto posible.
5. Describa una comunidad compleja de cultivos en la cual se encuentran poblaciones de organismos cultivados y no cultivados, que permite una reducción en el uso de químicos agrícolas sintéticos no renovables. Explique la contribución de cada miembro de la comunidad.
6. ¿Cuáles "cualidades emergentes" de la comunidad de cultivos no son evidentes dentro del agroecosistema a nivel de población o individuo?

Lecturas Recomendadas

Altieri, M.A. y M. Liebman (eds.). 1988. *Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches*. CRC Press: Boca Raton, FL.
 Una revisión comprensiva del papel ecológico de las arvenses en la agricultura, con varios capítulos que enfatizan la ecología de comunidad.

Beets, W.C. 1990. *Raising and Sustaining Productivity of Small-Holder Farming Systems in the Tropics*.

AgBe Publishing: Alkmaar, Holanda.
 Una revisión completa y práctica de la agricultura sostenible más apropiada para los trópicos, con buenas secciones de sistemas de cultivos múltiples.

Burn, A.J., T.H. Coaker, y P.C. Jepson. 1987. *Integrated Pest Management*. Academic Press: London.
 Una revisión de gran autoridad sobre el campo de Manejo Integrado de Plagas (MIP).

Francis, C.A. (ed.) 1986. *Multiple Cropping Systems*. Macmillan: New York.
 Un tratado muy completo sobre la agronomía y ecología de la gran diversidad de sistemas de cultivos múltiples en todo el mundo.

Francis, C.A. 1990. *Sustainable Agriculture in Temperate Zones*. John Wiley and Sons: New York.
 Una revisión de la agricultura sostenible en los países desarrollados, con ejemplos de cómo los cultivos múltiples pueden cumplir importantes funciones.

Huffaker, C.B., y P.S. Messenger. 1976. *Theory and Practice of Biological Control*. Academic Press: New York.
 Una referencia clásica sobre control biológico, con énfasis en el manejo de comunidades de cultivos como fundamento.

Putman, R.J. 1994. *Community Ecology*. Chapman & Hall: London.
 Un texto enfocado en la búsqueda de patrones tanto de tiempo como de espacio en la estructura, composición y dinámica de las comunidades ecológicas.

Rice, E.L. 1995. *Biological Control of Weeds and Plant Diseases: Advances in Applied Allelopathy*. University of Oklahoma Press: Norman, OK.
 Una revisión actualizada de la alelopatía como una vía para manejar poblaciones de arvenses y patógenos en comunidades de cultivos o bosques.

Whittaker, R.H. 1975. *Communities and Ecosystems*. 2nd Edition. Macmillan: New York.
 Una introducción excelente sobre los conceptos de comunidad en el contexto del ecosistema.

DIVERSIDAD Y ESTABILIDAD DEL AGROECOSISTEMA

Los agroecosistemas y los ecosistemas naturales están formados por organismos y el ambiente físico inerte en los cuales viven. Los tres capítulos anteriores han estado relacionados principalmente con los componentes físicos o biológicos de estos sistemas a nivel de poblaciones y comunidades. En este Capítulo, comenzamos a agregar los componentes abióticos de los ecosistemas, alcanzando el nivel de estudio del ecosistema. A este nivel, consideramos el sistema como una totalidad, obteniendo una imagen más completa de su estructura y función.

La complejidad que caracteriza al sistema es la base para las interacciones ecológicas que son fundamento clave para el diseño de agroecosistemas sostenibles.

La diversidad antes que nada es un producto, una medida y un fundamento de la complejidad del sistema, de aquí su habilidad para estimular un funcionamiento sostenible. Desde una perspectiva, la diversidad del ecosistema viene a ser el resultado de las formas en que están organizados e interactúa los diferentes componentes vivos e inertes del sistema. Desde otra perspectiva, la diversidad - manifestada por la complejidad de ciclos bioquímicos y la variedad de organismos vivientes - es lo que hace posible la organización e interacción del sistema mismo.

En este Capítulo, primero exploramos el significado de manejar los agroecosistemas como sistemas completos, aprovechando sus cualidades emergentes. Después examinamos la biodiversidad en ecosistemas naturales, el valor de la diversidad en un agroecosistema dado, cómo es evaluada la diversidad, y la función posible de la teoría de biogeografía de islas en el manejo de la diversidad. Finalmente, exploramos las conexiones entre diversidad ecológica, estabilidad y sostenibilidad en términos que apoyen el desarrollo de un marco de referencia para el diseño y manejo de los agroecosistemas.

ENFOQUES Y OPORTUNIDADES CONSIDERANDO EL SISTEMA EN SU TOTALIDAD

En el Capítulo 15 vimos cómo las interacciones entre las poblaciones de una comunidad de un cultivo dan como resultado cualidades emergentes que existen sólo en el nivel de comunidad. A nivel de ecosistema, existe otro grupo de cualidades emergentes que hacen al agroecosistema mucho más grande que la suma de sus partes (o la granja mucho más grande que la suma de los cultivos que posee). El manejo que funcionaría a este nivel puede tomar ventaja de la gran variedad de interacciones y procesos benéficos.

Manejando el Sistema en su Totalidad

La agroecología enfatiza la necesidad de estudiar tanto las partes como la totalidad. Aunque el concepto de que la totalidad es mayor que la suma de las partes sea ampliamente reconocido, esto ha sido ignorado durante mucho tiempo por la tecnología y la agronomía moderna, que han enfatizado el estudio en detalle de una planta o un animal, como una forma de enfrentar los problemas complejos de la producción de la granja y su viabilidad. Hemos aprendido mucho de la especialización y de un enfoque reduccionista en los componentes de un cultivo de un sistema agrícola, pero un entendimiento de toda la granja (y el sistema alimenticio completo) también debe desarrollarse para entender totalmente la sostenibilidad agrícola e implementar prácticas de manejo sostenible.

Cuando el manejo de los agroecosistemas considera las oportunidades que se presentan por las cualidades emergentes del sistema total, el paradigma de condiciones de *control* y poblaciones es reemplazado por el paradigma de *manejo*. Con el paradigma de manejo, estamos tratando siempre de considerar los efectos de cualquier acción o práctica sobre todo el

sistema, deliberadamente diseñamos prácticas que están basadas en el funcionamiento del sistema como un todo y de las cualidades emergentes.

Bajo el enfoque convencional, el intento de controlar rígidamente y homogeneizar frecuentemente todas las condiciones de forma individual, ocasiona la eliminación de interferencias y relaciones benéficas, dejando sólo las interacciones y relaciones negativas. Las prácticas de manejo convencional funcionan primordialmente a nivel de individuo o de la población en el sistema, en vez de funcionar a nivel de comunidad o del ecosistema, en donde ocurren interacciones más complejas.

Los problemas inherentes a nivel de población y de enfoques convencionales orientados al control, se han visto en décadas pasadas cuando son aplicados en el control de insectos plaga, arvenses y patógenos. Basados en el principio de que un insecto o arvense benéfico es el que está muerto, se ha desarrollado una increíble variedad de tecnologías para remover o eliminar cada plaga clave de los sistemas de cultivo. Estas tecnologías han simplificado los agroecosistemas en varias formas –por ejemplo, eliminando los depredadores de las plagas claves. Sin embargo, en agroecosistemas simplificados las invasiones de plagas son más comunes y perjudiciales, y el uso de insumos externos debe aumentarse para enfrentar esos problemas.

Construyendo con Diversidad

La prioridad principal en el manejo del sistema como un todo es crear un agroecosistema más complejo y diverso, porque sólo con mucha diversidad hay un potencial de obtener interacciones benéficas. El productor empieza aumentando el número de especies vegetales en el sistema, mediante diferentes prácticas de siembra, que se analizan más adelante con mayor detalle. La diversificación conduce a cambios positivos en las condiciones abióticas y atrae poblaciones de artrópodos benéficos y otros animales. Se desarro-

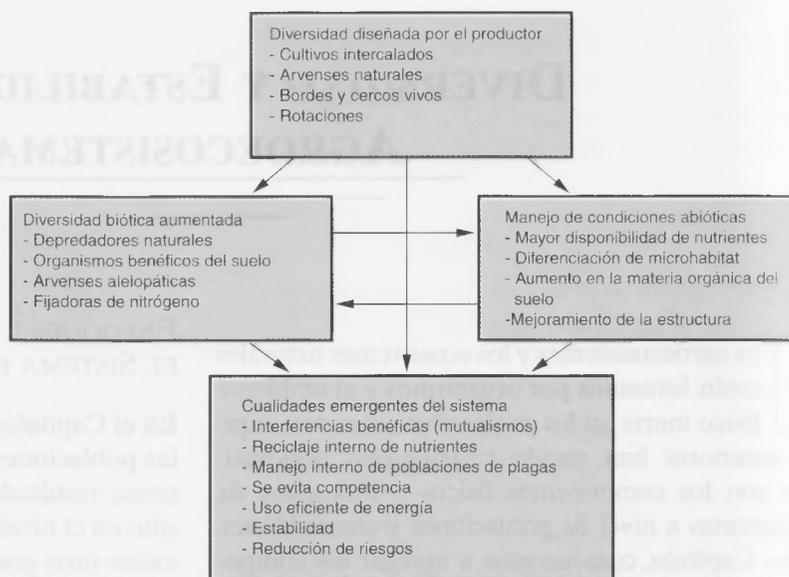


FIGURA 16.1

Dinámica del sistema en agroecosistemas diversos.

llan cualidades emergentes que permiten al sistema con un manejo apropiado de sus componentes específicos funcionar de manera que se mantiene la fertilidad, la productividad y regula las poblaciones de plagas. Esta concepción muy general de la dinámica del manejo de un agroecosistema está esquematizada en la Figura 16.1.

En un sistema complejo y diverso, todos los retos que enfrentan los productores, pueden ser solucionados con un manejo apropiado de cada uno de los componentes y sus interacciones, haciendo la dependencia de insumos externos casi innecesaria. Por ejemplo, en el manejo de plagas, las poblaciones pueden ser controladas por las interacciones en el sistema, establecidas intencionalmente por quien maneja el agroecosistema.

Los diversos métodos "alternativos" de manejo de plagas, desarrollados por agricultores orgánicos y agroecólogos, son un buen ejemplo de la diversidad basada en el manejo de la totalidad del sistema. Estos métodos se basan en el aumento de la diversidad y complejidad del agroecosistema, como principios para establecer interacciones positivas que mantengan bajo cierto control a las poblaciones de plagas. Descripciones de algunos de estos métodos, aplicados específicamente en agroecosistemas se presentan en el Cuadro 16.1.

CUADRO 16.1 Ejemplos de manejo alternativo de plagas basado en interacciones del sistema

Plaga problema	Práctica de manejo alternativo	Mecanismo(s) de acción
Polilla saltona (<i>Phyllotreta cruciferae</i>), daña la brócoli.	Cultivo intercalado con mostaza silvestre (<i>Brassica</i> spp.).	Cultivo trampa atrae a la plaga
Micador de la hoja de la uva (<i>Erythroneura elegantula</i>) daña las hojas del viñedo.	Siembra de zarzamora (<i>Rubus</i> spp.) en los bordes del viñedo.	Aumenta la abundancia de hospederos alternativos para la avispa parásita <i>Anaegus epos</i> .
Áfidos (<i>Rhopalosiphum maidis</i>), daña la caña de azúcar.	Siembra de gramíneas agresivas en los bordes.	Las gramíneas desplazan otras plantas que hospedan áfidos.
Daño del gusano elotero (<i>Heliothis zea</i>).	Permitiendo el desarrollo del complejo natural de arvenses en el cultivo.	Estimula la presencia y eficacia de depredadores de huevecillos y larvas de insectos plaga.
Daño del gusano soldado (<i>Spodoptera frugiperda</i>).	Cultivo intercalado con frijol.	Aumenta la abundancia y actividad de insectos benéficos.
Daño en yuca de la mosquita blanca (<i>Aleurotrachelus socialis</i>)	Cultivo intercalado con frijol caupí.	Aumenta el vigor de la planta de yuca y aumenta la abundancia de enemigos naturales.
Daño en ajonjolí del gusano telarañero (<i>Antigrosta</i> sp.).	Cultivo intercalado con maíz o sorgo.	La sombra del cultivo rechaza la plaga.
Daño en repollo de la palomilla de corso de diamante (<i>Plutella xylostella</i>).	Cultivo intercalado con tomate.	Rechaza la palomilla químicamente, o enmascara la presencia del repollo.
Daño en manzana por la palomilla (<i>Cydia pomonella</i>).	Cultivos de cobertura con plantas específicas.	Provee fuente alternativa de alimento y hábitat para los enemigos naturales de la palomilla.
Daño en viñedos por la araña del Pacífico (<i>Eotetranychus willamette</i>).	Cultivo de cobertura con gramíneas.	Promueve la presencia de arañas depredadoras proveyendo hábitats de hibernación para presas alternativas de <i>E. wellamette</i> .

Adaptado de Altieri (1994a) y Andow (1991).

TEMA ESPECIAL

Rhizobium, Leguminosas y el Ciclo de Nitrógeno

Una de las formas importantes en que los productores pueden tomar ventaja de la gran variedad del ecosistema, es introducir leguminosas fijadoras de nitrógeno al agroecosistema. Como resultado de la relación mutualista entre las plantas leguminosas y bacterias del género *Rhizobium*, el nitrógeno derivado de la atmósfera es puesto a disposición de los

miembros simbioses del sistema. La habilidad de un sistema para satisfacer sus necesidades de nitrógeno de esta forma, es una cualidad emergente hecha posible por la diversidad biótica.

Las bacterias *Rhizobium* poseen la habilidad de capturar nitrógeno atmosférico del aire y del suelo, y convertirlo en una forma utilizable para las bacterias y también para las plantas. Estas bacterias pueden vivir libremente en el suelo; sin embargo, cuando las leguminosas están presentes, las bacterias infectan la estructura radical. Una bacteria se mueve hacia una célula radical interna, diferen-

ciándose y produciendo una forma de nódulo, en el cual la bacteria puede reproducirse. La bacteria en el nódulo radical empieza a recibir de la planta hospedante todos los azúcares que necesita, dándole la capacidad de vivir independiente; en reciprocidad el nitrógeno fijado por ellas lo vuelven disponible para la planta hospedante. La interacción provee una ventaja para ambos organismos: la planta es capaz de obtener nitrógeno que no estaría disponible sin la simbiosis, y la bacteria es capaz de alcanzar altas poblaciones que no podría obtener si viviera libre en el suelo. Se da mayor fijación de nitrógeno con leguminosas noduladas que con *Rhizobium* viviendo libre. Cuando la planta hospedante muere, la bacteria puede regresar a un tipo de vida autotrófica e incorporarse a la comunidad del suelo.

Como el nitrógeno es generalmente un nutriente limitante, la relación leguminosa - *Rhizobium* le permite sobrevivir en un suelo que contenga muy poco nitrógeno como para mantener a otras plantas. Y debido a que la leguminosa incorpora el nitrógeno que recibe de la bacteria en su biomasa, el nitrógeno entonces se convierte en

parte del suelo, disponible para ser usado por otras plantas si la leguminosa es incorporada al suelo cuando muere.

Este mutualismo ha sido importante en agricultura. La simbiosis leguminosa-*Rhizobium* es la fuente primaria de adición de nitrógeno en muchos agroecosistemas tradicionales, y fue uno de los únicos métodos usados para incorporar nitrógeno ambiental a muchos sistemas de cultivo, antes del desarrollo del fertilizante nitrogenado. Los cultivos de leguminosas han sido intercalados con cultivos no leguminosos, como en el policultivo de maíz-frijol-calabaza en América Latina, y las leguminosas son usadas como cultivos de cobertura y forraje fresco en los Estados Unidos y otras regiones, para mejorar la calidad del suelo y su contenido de nitrógeno. Las leguminosas también han sido importantes en el manejo de áreas en descanso agrícola. Todos estos sistemas toman ventaja de la simbiosis leguminosa-*Rhizobium*, usando la fijación biológica de nitrógeno para hacer que este elemento esté disponible para la comunidad vegetal completa y finalmente para los humanos.

DIVERSIDAD ECOLÓGICA

En ecología, el concepto de diversidad tiende a ser aplicado a nivel de comunidad: la diversidad es interpretada como el número de especies diferentes que conforman una comunidad en un lugar determinado. Sin embargo, los ecosistemas tienen otro tipo de variedad y heterogeneidad que va más allá de la predefinida por el número de especies. Los ecosistemas tienen diversidad en el arreglo espacial de sus componentes; por ejemplo, como se puede ver en los diferentes niveles de doseles en un bosque. Tiene diversidad en sus procesos funcionales y diversidad en los genomas de su biota. Y ya que los ecosistemas cambian en varias formas en el tiempo, tanto cíclica como direccionalmente, pueden presentar lo que se llamaría diversidad temporal. La diversidad, consecuentemente, tiene una variedad de diferentes *dimensiones*. Cuando estas dimensiones son reconocidas y definidas, el concepto de diversidad por sí solo es amplio y mucho más complejo - viene a ser lo que denominaremos **diversidad ecológica**.

CUADRO 16.2 Dimensiones de la diversidad ecológica en un ecosistema

Dimensión	Descripción
Especies	Número de diferentes especies en el sistema
Genética	Grado de variabilidad de información genética en el sistema (intra e inter especies)
Vertical	Número de diferentes niveles horizontales y estratos en el sistema.
Horizontal	Patrones de distribución espacial de los organismos en el sistema.
Estructural	Número de localidades (nichos, papeles tróficos) en la organización del sistema.
Funcional	La complejidad de interacciones, flujo de energía, y reciclaje de material entre los componentes del sistema.
Temporal	Grado de la heterogeneidad de cambios cíclicos en el sistema (diarios, estacionales, etc.)

Algunas de las posibles dimensiones de la diversidad ecológica se enumeran en el Cuadro 16.2. Otras dimensiones pueden ser reconocidas y definidas, pero estas siete dimensiones serán las utilizadas en este texto. (El término *biodiversidad* es empleado comúnmente para referirse a la combinación de la diversidad de especies y la diversidad genética). Estas diferentes dimensiones de la diversidad ecológica, son herramientas útiles para entender completamente la diversidad tanto en ecosistemas naturales como en agroecosistemas.

Diversidad en Ecosistemas Naturales

La diversidad parece ser una característica inherente de la mayoría de los ecosistemas naturales. Aunque el grado de diversidad entre diferentes ecosistemas varía ampliamente, los ecosistemas en general tienden a expresar gran diversidad dadas las limitaciones de sus ambientes abióticos.

La diversidad es en parte una función de la dinámica evolutiva. Como se analizó en el Capítulo 14, la mutación, la recombinación genética y la selección natural se combinan para producir variabilidad, innovación y diferenciación en la biota terrestre. Una vez que la diversidad es generada, tiende a ser autofortalecida. Mayor diversidad de especies conduce a una gran diferenciación de hábitats y mayor productividad, la cual permite más diversidad de especies.

La diversidad desempeña un importante papel en el mantenimiento de la estructura y función del ecosistema. Desde que Tansley (1935) acuñó el término "ecosistema", para referirse a la combinación de comunidades de plantas y animales y su ambiente físico, los ecólogos han tratado de demostrar la relación entre la diversidad y la estabilidad del sistema. Los ecosistemas naturales generalmente se apegan al principio de que mayor diversidad permite gran resistencia a las perturbaciones. Los ecosistemas con una gran diversidad tienden a recuperarse de perturbaciones y restablecer el balance en sus procesos de reciclaje de material y flujos de energía; en ecosistemas con poca diversidad, las perturbaciones pueden causar cambios permanentes en sus funciones, teniendo como resultado la pérdida de recursos del ecosistema y cambios en su conformación de especies.

Escala de la Diversidad

El tamaño del área a ser considerada tiene un impacto sobre cómo se ha de medir la diversidad (diversidad de especies en particular). La diversidad de especies de un lugar determinado, en un bosque, en un valle con un río es diferente a la diversidad de especies de las diferentes comunidades que se encuentran al otro lado del río en ese valle.

La diversidad de especies en un lugar determinado es generalmente denominada **diversidad alfa**. Esta es simplemente la variedad de especies en una área relativamente pequeña de una comunidad. La diversidad de especies en comunidades o hábitats - la variedad de especies de un lugar a otro - es denominada **diversidad beta**. Aún a gran escala, existe la **diversidad gama**, que es una medida de la diversidad de especies de una región tal como una cordillera o de un valle con un río.

La diferencia entre los tres tipos de diversidad puede ser ilustrada con un transecto hipotético de 5 km. Es posible determinar la diversidad alfa en cualquier lugar a lo largo del transecto, por ejemplo, el conteo de especies dentro de 10 m en un punto específico. La determinación de la diversidad beta, en contraste, incluye al menos dos puntos a lo largo del transecto en hábitats diferentes pero adyacentes. Si la conformación de especies de los dos lugares es muy diferente, la diversidad beta es grande; si la conformación de especies cambia poco entre los dos hábitats, la diversidad beta es poca. La determinación de la diversidad gama se hace a lo largo del transecto, considerando el número de especies y la variación de su distribución. En principio, la diferencia entre la diversidad alfa, beta y gama puede extenderse a otras dimensiones de la diversidad ecológica, tales como la diversidad estructural y funcional.

La diversidad alfa, beta y gama son conceptos útiles porque nos permiten describir cómo varían los ecosistemas y paisajes en su estructura y diversidad. Por ejemplo, un pastizal natural muy diverso que se extiende por cientos de kilómetros en cualquier dirección, es probable que tenga gran diversidad alfa, pero ya que las mismas especies se encuentran en la misma proporción relativa en todos los lugares de una amplia área, la diversidad beta y gama son relativamente bajas. Como un ejemplo contrastante, considere un paisaje conformado de un mosaico complejo

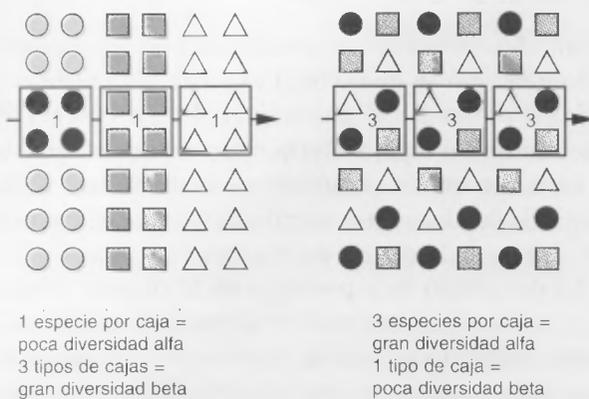


FIGURA 16.2

Diversidad alfa vs. diversidad beta en el contexto de agroecosistema. Por simplicidad, cada forma representa una planta del cultivo y cada grupo una localidad. Esta escala es algo arbitraria y de aquí que una calidad puede comprometer nuevas plantas del cultivo. El objetivo del diagrama es mostrar el contraste que puede representar: (a) tres cultivos sembrados en franjas, y (b) cultivos intercalados entre los tres cultivos.

de comunidades simples, tales como un pastizal no nativo, una comunidad de bosque dominada por una sola especie, y una comunidad de vegetación baja que crece en laderas accidentadas o escarpadas. La diversidad alfa es relativamente baja en cada una de las comunidades, pero en cualquier transecto en el área que cruce una variedad de grupos de especies, hace a la diversidad beta y gama relativamente alta.

Las escalas de la diversidad alfa y beta tienen aplicaciones útiles particularmente en los agroecosistemas. Un sistema de cultivo con gran diversidad beta, por ejemplo, puede proveer generalmente las mismas ventajas que un sistema de cultivo con gran diversidad alfa, siempre y cuando ofrezca mayor facilidad de manejo (Figura 16.2).

Procesos Sucesionales y Cambios de Diversidad

Estudios de ecosistemas naturales en sus primeras etapas de desarrollo o después de perturbaciones, indican que todas las dimensiones de la diversidad tienden a aumentar a través del tiempo. Este proceso sucede por la diversificación de nichos, modificaciones de hábitats, desplazamiento competitivo, reparti-

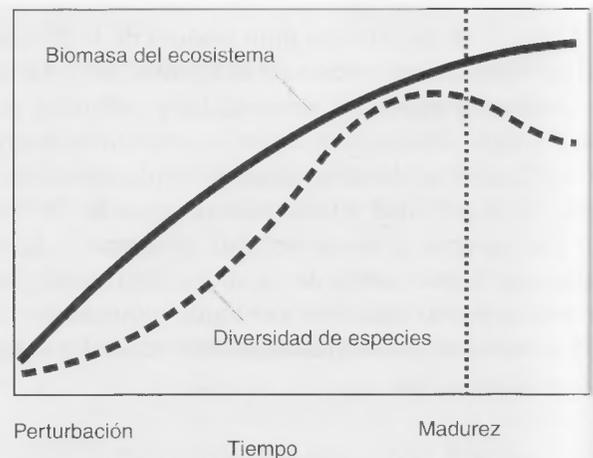


FIGURA 16.3

Cambios en la diversidad de especies y biomasa durante la sucesión secundaria.

ción de recursos, y el desarrollo de coexistencias, mutualismos y otras formas de interferencia.

La variabilidad y fluctuación en los procesos de los ecosistemas están influenciados directamente por esta diversidad, dando al sistema la apariencia de mayor estabilidad al aumentar la diversidad.

Cuando un ecosistema es perturbado, cada una de las dimensiones en su diversidad ecológica es simplificada, o regresada a una etapa de desarrollo anterior; el número de especies es reducido, la estratificación vertical disminuye y ocurren menos interacciones. Posterior a la perturbación, el ecosistema inicia un proceso de recuperación que es denominado sucesión secundaria (Figura 16.3 y el Capítulo 17 presenta más detalles). Durante este proceso, el sistema empieza a restablecer la diversidad de especies, interacciones, y procesos que existieron antes de la perturbación.

Eventualmente, el sistema alcanza un estado llamado madurez, la cual puede ser definida como la condición sucesional en la cual puede ser desarrollado el completo potencial del flujo de energía, reciclaje de nutrientes, y dinámica poblacional en el ambiente físico en el que se encuentra. La diversidad estructural y funcional de un ecosistema maduro provee resistencia al cambio en caso de futuras perturbaciones menores.

Aunque la diversidad tiende a aumentar en las etapas sucesionales, investigaciones ecológicas recientes indican que la madurez puede no representar etapas de la mayor diversidad, al menos en términos

de especies. En su lugar, la mayor diversidad es adquirida conforme un sistema se acerca a su madurez, reduciéndose ésta ligeramente después haber alcanzado la madurez completa. Aunque en tasas lentas, la biomasa continúa incrementándose durante la madurez.

Diversidad y Estabilidad

En ecología se ha discutido considerablemente la relación entre la diversidad y la estabilidad. Aparentemente, hay alguna correlación entre las dos – esto es, a mayor diversidad de un ecosistema, hay más resistencia al cambio, y mejores posibilidades de recuperarse de perturbaciones- pero hay desacuerdo sobre el grado y fortaleza de esta correlación.

Mucho de este problema viene de la naturaleza restringida de la definición aceptada de estabilidad. "Estabilidad" usualmente se refiere a la ausencia relativa de fluctuación en las poblaciones de organismos del sistema, indicando una condición balanceada, o sin cambio. Esta noción de estabilidad es inadecuada, especialmente para describir los resultados ecológicos de la diversidad. Lo que necesitamos es una definición más amplia de estabilidad (o un nuevo término) basado en las características del sistema, una definición que enfoque la *fortaleza* de un ecosistema, su habilidad de mantener niveles complejos de interacciones y procesos autorreguladores de flujo de energía y reciclaje de materiales. Esta noción ampliada de estabilidad se requiere, en particular, para el entendimiento del valor y uso de diversidad en los agroecosistemas, los cuales son estables según el término convencional.

Para un mejor entendimiento de lo que realmente es estabilidad, necesitamos más investigación de las posibles relaciones entre las diferentes formas de diversidad ecológica y los procesos específicos de un ecosistema y sus características. Algunos trabajos importantes se han realizado. Por ejemplo, se ha determinado que una gran diversidad de especies de aves, está correlacionada con una estructura compleja de la comunidad, porque ésta mantiene mayor variedad de comportamientos de anidamiento y alimentación. De forma similar, la diversidad depredador-presa y una cadena alimenticia más compleja está relacionada tanto con el número de especies así como con la diversidad del hábitat.

Debemos seguir teniendo cuidado de no caer en la trampa de un razonamiento circular, donde empezamos a creer que la diversidad siempre conduce a la estabilidad y una vez que tenemos más estabilidad, se llegará a tener más diversidad. Para que los conceptos de diversidad y estabilidad sean aplicados en agricultura, necesitamos estudios que correlacionen los diferentes tipos de diversidad con los procesos de productividad y de ahí hacia la sostenibilidad.

Diversidad Ecológica en Agroecosistemas

En la mayoría de los agroecosistemas, regularmente, las perturbaciones suceden mucho más frecuente y con mayor intensidad que en los ecosistemas. Raramente los agroecosistemas pueden alcanzar un gran desarrollo sucesional. Como resultado, la diversidad en los agroecosistemas es difícil de mantener.

La pérdida de diversidad debilita los enlaces funcionales entre especies que caracterizan a los ecosistemas naturales. Las tasas de reciclaje de nutrientes, los cambios de eficiencia y el flujo de energía son alterados, y aumenta la dependencia de insumos y de interferencia humana. Por estas razones, un agroecosistema es considerado ecológicamente inestable.

Sin embargo, los agroecosistemas no necesitan ser tan simplificados y pobres en diversidad como un agroecosistema convencional. Dentro de las limitantes impuestas por la necesidad de cosechar biomasa, los agroecosistemas pueden tender al nivel de diversidad que presentan los ecosistemas naturales, y beneficiarse del aumento de la estabilidad que permite una mayor diversidad. Manejar la complejidad de interacciones posibles, cuando la mayoría de los elementos que estimulan la diversidad están presentes en el sistema de granja, es clave para reducir la necesidad de insumos externos y procurar la sostenibilidad.

El Valor de la Diversidad del Agroecosistema

Una estrategia clave en agricultura sostenible es reincorporar la diversidad en el paisaje agrícola y manejarlo con mayor eficacia. Aumentar la diversidad es un enfoque contrario a la mayoría de la agricultura convencional actual, la cual alcanza su extremo en los monocultivos a gran escala. Parecería que la diversidad es vista como vulnerabilidad en esos sistemas, es-

pecialmente cuando consideramos todas las entradas y prácticas que se han desarrollado para limitar la diversidad y mantener la uniformidad.

Investigaciones recientes en sistemas de cultivos múltiples subestiman la gran importancia de la diversidad en la agricultura (Francis 1986, Amador y Gliessman 1990, Vandermeer 1989, Altieri 1995b). La diversidad es de gran valor para los agroecosistemas por las siguientes razones:

- Con una gran diversidad, la diferenciación de hábitats aumenta, permitiendo a las especies del sistema que sean "especialistas del hábitat". Cada grupo puede crecer en un ambiente exclusivo que satisface sus necesidades únicas.
 - Si la diversidad aumenta, también aumentan las oportunidades de coexistencia y la interferencia entre especies que pueden estimular la sostenibilidad agroecológica. La relación entre las leguminosas fijadoras de nitrógeno y los cultivos asociados a ellas pueden ser el primer ejemplo, como se ha discutido en párrafos anteriores.
 - En un agroecosistema diverso, los ambientes perturbados y asociados con situaciones agrícolas son ventajosos. Los hábitats abiertos pueden ser colonizados por especies útiles que ya existen en el sistema, en vez de ser invadidos por arvenses, e invasores pioneros provenientes de fuera del sistema.
 - Una gran diversidad hace posible varios tipos de dinámicas de poblaciones benéficas entre herbívoros y sus depredadores. Por ejemplo, un sistema diverso puede estimular la presencia de varias poblaciones de herbívoros, siendo solo algunos de ellos realmente plagas, así como la presencia de depredadores que se alimentan de todos los herbívoros. Los depredadores estimulan la diversidad entre las especies herbívoras, al mantener control sobre alguna especie en particular. Con gran diversidad de herbívoros, el herbívoro plaga no puede dominar ni perjudicar a ningún cultivo.
 - Una mayor diversidad generalmente permite una mejor eficiencia en el uso de recursos en un agroecosistema. Existe una mejor adaptación a la heterogeneidad de hábitats a nivel de sistema, que conduce a la complementariedad de las necesidades de los cultivos, diversificación de nichos, traslape de nichos de las especies y compartir recursos. Por ejemplo, el tradicional cultivo múltiple de maíz-frijol-calabaza junta tres cultivos diferentes pero complementarios entre sí. Cuando los tres son sembrados en un campo heterogéneo, las condiciones del suelo satisfacen las necesidades de al menos uno de los tres cultivos. Cuando son sembrados en un suelo uniforme cada cultivo ocupa un nicho ligeramente diferente, teniendo diferentes demandas de los nutrimentos del suelo.
 - La diversidad reduce los riesgos para el productor o campesino, especialmente en áreas con condiciones ambientales impredecibles. Si en un cultivo no le va bien, los ingresos de los otros cultivos pueden compensar esa baja.
 - Un ensamblaje diverso de cultivos puede crear una diversidad de microclimas en un sistema de cultivo, que puede ser ocupado por un amplio rango de organismos, no cultivos, incluyendo depredadores, parásitos benéficos y antagonistas – que son importantes en el sistema en general, y que no podrían ser atraídos a un sistema uniforme y simplificado.
 - La diversidad en el paisaje agrícola puede contribuir a la conservación de la biodiversidad en los ecosistemas naturales que se encuentran alrededor, un aspecto que será discutido en el Capítulo 19.
 - La diversidad – especialmente aquella que se encuentra bajo el nivel del suelo y es parte del sistema – realiza varios servicios ecológicos que tiene impacto tanto dentro como fuera de la parcela, tales como el ciclo de nutrimentos, regulación de procesos hidrológicos y la desintoxicación de productos químicos nocivos.
- Cuando nuestro entendimiento sobre la diversidad vaya mas allá de las especies de cultivo, incluyendo plantas no cultivadas (comúnmente llamadas arvenses, pero con valor ecológico y humano), animales (especialmente enemigos de plagas o animales benéficos a los humanos) y microorganismos (la diversidad de bacterias y hongos son esenciales para mantener muchos procesos bajo el nivel del suelo del agroecosistema), podremos empezar a ver el rango de procesos ecológicos que son promovidos por la mayor diversidad.

Métodos para Aumentar la Diversidad en los Sistemas Agrícolas

Una variedad de opciones y alternativas están disponibles para incrementar los beneficios de la diversidad, señalados anteriormente, al paisaje agrícola. Estas opciones pueden considerar lo siguiente: (1) introducir nuevas especies al sistema de cultivo existente, (2) reorganizar o reestructurar las especies que ya están presentes, (3) agregar prácticas e insumos estimuladores de diversidad y (4) eliminar prácticas e insumos que reducen o restringen la diversidad.

Cultivos Intercalados. La forma principal y directa de aumentar la diversidad alfa de un agroecosistema, es sembrar dos o más cultivos juntos intercalados, que permitan interacciones entre los individuos de diferentes cultivos. El intercalar cultivos es una forma común de cultivos múltiples, lo cual es definido como "la intensificación y diversificación de cultivos en dimensiones de tiempo y espacio" (Francis 1986). El intercalar cultivos puede agregar diversidad temporal, mediante siembras secuenciales de diferentes cultivos durante la misma estación, y la presencia de más de un cultivo agrega diversidad horizontal, vertical, estructural y funcional al sistema. Estos sistemas están más desarrollados en los sistemas de granjas tradicionales de las áreas rurales o en desarrollo, especialmente en los trópicos. Los cultivos intercalados o sistemas de policultivo varían desde mezclas relativamente simples de dos o tres cultivos, hasta

complejas mezclas de cultivos que se encuentran en agroecosistemas de agrosilvicultura o en agroecosistemas de huertos caseros (que se discutirán con más detalle en el Capítulo 17).

Cultivo en Franjas. Otra forma de cultivos múltiples es sembrar diferentes cultivos en franjas adyacentes.



FIGURA 16.4
Dos ejemplos de cultivos múltiples. Zanahoria, remolacha y cebolla crecen juntos en Witzenhausen, Alemania (arriba); se combinan cultivos anuales y perennes para formar el huerto casero diverso en Riva de Garda, Italia (izquierda).

creando lo que se puede denominar un policultivo de monocultivos. Esta práctica, la cual aumenta la diversidad beta en lugar de la diversidad alfa, puede proveer muchos de los beneficios de los cultivos múltiples. Para algunos cultivos o mezcla de cultivos, este es un método práctico para aumentar la diversidad, ya que presenta menos retos u obstáculos para el manejo que los cultivos intercalados.

Cercas Vivas y Vegetación Amortiguadora. Los árboles y arbustos plantados en el perímetro de los campos, parcelas, a lo largo de caminos de una granja, o para marcar límites, pueden tener muchas funciones útiles. En términos prácticos, pueden ofrecer protección contra el viento, excluir (o encerrar) animales y producen una amplia gama de productos fo-



FIGURA 16.5

Una cerca viva de uso múltiple alrededor de un huerto casero en Tepeyanco, Tlaxcala, México. El cactus forma una barrera contra animales y el chayote y los árboles de albaricoque proveen comida.

restales (leña, material de construcción, frutas, etc.). Ecológicamente, los cercos y las franjas amortiguadoras de vegetación aumentan la diversidad beta de una granja o parcela, y pueden servir para atraer y proveer de organismos benéficos al sistema. Cuando se tiene vegetación plantada en franjas más anchas, especialmente entre el área agrícola y la vegetación adyacente a ecosistemas naturales, se forman zonas amortiguadoras que pueden reducir un amplio ámbito de potenciales impactos de un sistema a otro, así como también aumenta la biodiversidad general de la región.

Cultivos de Cobertura. Un cultivo de cobertura es una especie que no es el cultivo principal, se siembra en el campo o parcela para proveer cobertura al suelo, generalmente entre los ciclos agrícolas. Los cultivos de cobertura pueden ser anuales o perennes, e incluye muchos grupos taxonómicos, aunque predominantemente se utilizan los pastos o gramas y leguminosas. Al aumentar la diversidad en un sistema al sembrar uno o más cultivos de cobertura, se tienen una variedad de beneficios importantes. Los cultivos de cobertura aumentan la materia orgánica del suelo, estimulan la actividad biológica del suelo y la diversidad de la biota del mismo, atrapa nutrientes del suelo que no son aprovechados por los cultivos, reduce la erosión del suelo, contribuye a la fijación biológica del nitrógeno (si el cultivo de cobertura es una leguminosa), y puede ser hospedante alternativo para enemigos benéficos de los insectos plaga de los cultivos. En algunos sistemas, tales como huertos, los cultivos de cobertura pueden servir para un propósito adicional: inhibir el desarrollo de arvenses nocivas (Paulus 1994).

Rotaciones. El sembrar cultivos en rotación es un método importante para aumentar la diversidad de un sistema en el tiempo. Las rotaciones generalmente consisten en sembrar diferentes cultivos en sucesión o en secuencia recurrente. Entre mayor sea la diferencia del impacto ecológico en el suelo de los cultivos en rotación, mayor será el beneficio de este método. Alternando cultivos se puede crear lo que se conoce como efecto rotacional, que se obtiene cuando un cultivo se beneficia cuando se siembra después de otro cultivo diferente, en comparación de si fuera sembrado en un sistema de monocultivo continuo.

Agregando los residuos de diferentes plantas al suelo, las rotaciones ayudan a mantener la diversidad biológica. Cada tipo de residuo varía química y biológicamente, estimulando y/o inhibiendo diferentes organismos del suelo. En algunos casos, los residuos de un cultivo son capaces de promover la actividad de organismos que son antagonicos a plagas o enfermedades para el cultivo subsiguiente. Las rotaciones también tienden a mejorar la fertilidad del suelo y sus propiedades físicas, reducen la erosión del suelo y adicionan más materia orgánica. Las ventajas bien conocidas de la rotación soya/maíz/leguminosa-heno, usadas en el medio oeste de Estados Unidos, están basadas en parte en la manera en que la mayor diversidad temporal agrega nutrimentos y ayuda al control de enfermedades. La investigación sobre los impactos de las rotaciones en la diversidad puede mejorar la efectividad de esta importante práctica (Altieri 1995b).

Barbechos o Cultivo de Descanso. Una variación de la práctica de rotación es permitir, en la secuencia de cultivos, un periodo en donde la tierra simplemente es dejada sin cultivar, o en barbecho. La introducción de un periodo de descanso permite que el suelo "descanse", un proceso que involucra la sucesión secundaria y la recuperación de la diversidad en muchos elementos del sistema, especialmente el suelo. La agricultura transhumante, discutida en el Capítulo 10, es probablemente el sistema de barbecho mejor conocido, el periodo largo de descanso permite la reintroducción de diversidad de plantas y animales nativos y la recuperación de la fertilidad del suelo. En algunos sistemas, el periodo de descanso es utilizado principalmente para crear un mosaico de parcelas en diferentes etapas sucesionales, desde campos cultivados hasta el segundo crecimiento de la vegetación nativa. En regiones de agricultura de secano, el descanso puede hacerse en años alternos para permitir que la lluvia recargue las reservas de humedad en el suelo, mientras se promueve la recuperación de la diversidad en el ecosistema suelo durante un ciclo sin cultivar. Otra variación sobre el uso del periodo de descanso es hacerlo productivo además de ser protector: en agroforestería de roza-tumba y descanso, cultivos específicos son introducidos justo antes de iniciar el descanso, o intencionalmente permitido para restablecer, de tal

forma que se puedan tener cosechas durante el periodo de descanso (Denevan y Padoch 1987). Cuando el barbecho es incorporado en un ciclo de cultivo, es la ausencia de la perturbación humana, no sólo la ausencia del cultivo, la que permite el proceso de recuperación de la diversidad.

Labranza Reducida o Labranza Mínima. Debido a que la principal función de la perturbación en un agroecosistema es limitar el desarrollo sucesional, la diversidad y la estabilidad, una práctica que reduzca la perturbación puede ayudar a promover la diversidad. Reducir la intensidad del cultivo del suelo y dejar residuos sobre la superficie de éste, constituye el método más eficaz de reducir la perturbación. Las ventajas de reducir tanto la frecuencia como la intensidad de cultivo se discutieron en el Capítulo 8. Comparaciones de labranza convencional y prácticas de cero labranza, muestran el aumento en la abundancia y actividad de las lombrices de tierra, mayor diversidad de organismos consumidores de suelo materia orgánica y de organismos descomponedores, y un mejoramiento de la estructura del suelo, capacidad de retención de nutrimentos, reciclaje interno de nutrimentos y contenido de materia orgánica (House y Stinner 1983, Stinner *et al.* 1984, Hendrix *et al.* 1986). Aun cuando la diversidad sobre el nivel del suelo, de un sistema de cultivo permanece baja, la diversidad de especies en el subsistema de descomponedores en el suelo aumenta, aún con una perturbación reducida del suelo. Aumentando la diversidad vegetal sobre el suelo se puede promover solamente este subsistema.

Altos Ingresos de Materia Orgánica. Altos niveles de materia orgánica son cruciales para fomentar la diversificación de especies del subsistema bajo el suelo, involucrando el mismo tipo de estimulación de la diversidad funcional y estructural, comentada anteriormente en los sistemas de labranza reducida. La adición de gran cantidad de materia orgánica ha sido considerada como un componente clave de la agricultura orgánica, dando muchos beneficios, los cuales fueron revisados en el Capítulo 8. El contenido de materia orgánica del suelo puede aumentarse con la aplicación de compost, incorporando residuos de cultivos, con cultivos de cobertura, diversificando cultivos y utilizando otras prácticas de cultivo que promuevan la diversidad.

CUADRO 16.3 Métodos para aumentar la diversidad ecológica en un agroecosistema

Dimensiones de la diversidad ecológica afectada

Método	Especie	Genético	Vertical	Horizontal	Estructural	Funcional	Temporal
Cultivos Intercalados	Directo	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto
Franja de cultivo	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto
Cercas vivas y vegetación amortiguadora	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto
Cultivo de cobertura	Directo	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto
Rotación de cultivos	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto
Cultivo descanso	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto
Labranza mínima	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto
Elevado entradas de materia	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto
Reducción de uso de químicos	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto

	Directo o efectos primarios
	Indirecto, secundario o efectos potenciales
	Poco o nada de efecto

Reducción del Uso de Agroquímicos. Desde hace mucho tiempo se reconoce que muchos plaguicidas dañan o matan muchos organismos ajenos a las plagas de los sistemas de cultivo, o dejan residuos que pueden limitar la abundancia y diversidad de otros organismos. De aquí que, reduciendo o eliminando el uso de plaguicidas, se remueve un obstáculo mayor para la re-diversificación del agroecosistema. El proceso de recolonización es discutido posteriormente en este Capítulo. Sin embargo, debe reconocerse que eliminar plaguicidas de un sistema que es dependiente de estos es un reto. La primera respuesta puede ser un aumento dramático en las poblaciones de las plagas, sólo con el tiempo y el reestablecimiento de la diversidad se pueden desarrollar mecanismos internos para mantener a las plagas bajo control. Un marco experimental para examinar los cambios en la diversidad que ocurre con el establecimiento de lo que puede ser llamado "un marco libre de estrés por plaguicidas" en el agroecosistema, se presenta en el Capítulo 20.

Manejo de la Diversificación

El cambiar de un agroecosistema uniforme y de monocultivo hacia un sistema más diverso, fortaleciendo los procesos benéficos y las interacciones, es un proceso de varios pasos. Inicialmente, todas las formas ya discutidas y comentadas de introducir diversidad en el paisaje agrícola, ayudan a mitigar los impactos negativos de las actividades agrícolas. Por lo tanto, la introducción de más especies, ya sea como un efecto directo como indirecto, amplía las oportunidades para la estructura y función de agroecosistemas integrados, permitiendo la formación de amortiguadores locales y la dinámica del sistema, para estimular la variabilidad como respuesta del sistema. Finalmente, los tipos y formas de interacción en un paisaje diversificado, hacen posible

más tipos de interacciones, desde exclusión competitiva hasta mutualismos simbióticos.

El manejo de la diversidad a nivel de granja o parcela es un gran reto. Comparado con el manejo convencional, este puede involucrar más trabajo, más riesgo y más incertidumbre. También se requieren más conocimientos. Sin embargo, finalmente, entendiendo las bases ecológicas de cómo opera la diversidad en un agroecosistema, y tomando ventaja de la complejidad en lugar de tratar de eliminarla, es la única estrategia que conduce a la sostenibilidad.

EVALUACIÓN DE LA DIVERSIDAD DE CULTIVOS Y SUS BENEFICIOS

Para manejar más eficientemente la diversidad, necesitamos formas para determinarla y evaluar cómo el aumento impacta realmente el comportamiento y funcionamiento de un agroecosistema. Necesitamos ser capaces de reconocer la presencia de diversidad

los patrones de su distribución en el paisaje, y necesitamos conocer, y a que grado, si la presencia de esa diversidad beneficia a la actividad del agroecosistema, especialmente desde el punto de vista del productor. Algunos enfoques han sido considerados para analizar e investigar la presencia e impacto de la diversidad.

Índices de Diversidad de Especies

Es indiscutible que cualquier tipo de sistema de cultivos intercalados es más diverso que un monocultivo. Comparando la diversidad de dos diferentes sistemas de cultivos intercalados— que varía en número de especies y proporciones de siembra — requiere que determinemos la diversidad de cada sistema. Para hacerlo, podemos utilizar herramientas y conceptos desarrollados por ecólogos para ecosistemas naturales.

Los ecólogos reconocen que la diversidad de un ecosistema o comunidad, es determinada por algo más que sólo el número de especies. Una comunidad de 50 árboles de sequoia, 50 robles y 50 abetos es más diverso que una comunidad conformada por 130 árboles de sequoia, 10 robles y 10 abetos. Ambas tienen el mismo número de especies y total de individuos, pero los individuos de la primera comunidad están distribuidos más uniformemente entre las especies que aquellos de la segunda comunidad, donde dominan los árboles de sequoia.

Este ejemplo demuestra que hay dos componentes de la diversidad de especies: el número de especies, denominado **riqueza de especies** y la uniformidad de la distribución de los individuos en el sistema entre las diferentes especies, denominado **uniformidad de especies**. Ambos componentes deben

ser considerados en cualquier medida comprensiva de diversidad, tanto de ecosistemas naturales como en agroecosistemas.

En el Cuadro 16.4 se demuestra cómo estos conceptos pueden ser aplicados al analizar la diversidad de los agroecosistemas, donde se comparan cuatro diferentes sistemas hipotéticos, cada uno con el mismo número de individuos de plantas de cultivo. Entre estos sistemas, el policultivo de tres cultivos es el más diverso, ya que es el único en el que tanto la riqueza de especies como la uniformidad de especies es alta, en relación con los otros sistemas.

En lugar de usar el número de individuos de cada especie como base para determinar la diversidad de especies del sistema, es posible utilizar algunas otras características de las especies, tales como la biomasa o la productividad. Esto puede ser más apropiado, por ejemplo, cuando la biomasa de un individuo típico de una especie es muy diferente de la biomasa de los individuos de las otras especies. El número de individuos, la biomasa y la productividad son ejemplos de **valor de importancia** para una especie en particular.

La ecología ofrece varias formas de cuantificar la diversidad de especies de un sistema. El método más simple es ignorar la uniformidad de especies y determinar el número de especies en términos de número de individuos. Esta medida se obtiene por el Índice de diversidad de Mergalef:

$$diversidad = \frac{s - 1}{\log N}$$

donde *s* es el número de especies y *N* es el número de individuos. La utilidad del índice de Mergalef es limitado, porque no puede distinguir la diversidad varia-

CUADRO 16.4 Medidas de diversidad de cuatro agroecosistemas hipotéticos

	Monocultivo	Policultivo uniforme de dos cultivos	Policultivo uniforme de tres cultivos	Policultivo no uniforme de tres cultivos
Plantas de maíz	300	150	100	250
Plantas de calabaza	0	150	100	25
Plantas de frijol	0	0	100	25
Número de especies (<i>s</i>)	1	2	3	3
Número de individuos (<i>N</i>)	300	300	300	300
Riqueza relativa de especies	baja	media	alta	alta
Uniformidad relativa de especies	alta	alta	alta	baja

Hay otros dos índices de diversidad que consideran la uniformidad de especies y son más útiles. El **índice de Shannon** es una aplicación de la teoría de la información, basado en la idea de que la mayor diversidad corresponde a la mayor incertidumbre en escoger aleatoriamente un individuo de una muestra particular. Este es dado por:

$$\text{diversidad} = \frac{N(N-1)}{\sum n_i(n_i-1)}$$

Para el Índice de Simpson, el valor mínimo es 1; para el Índice de Shannon es valor mínimo es 0. Ambos mínimos indican la ausencia de diversidad. La condición existente en un monocultivo. En teoría, el valor máximo para cada índice es limitado solamente por el número de especies y qué tan uniformemente están distribuidas en el ecosistema. Los ecosistemas naturales relativamente diversos tienen un índice de Simpson de 5 o mayor y un índice de Shannon de 3 o 4.

Los cálculos para los Índices de Mergalef, Simpson y Shannon para los sistemas hipotéticos del Cuadro 16.4, se presentan en el Cuadro 16.5. Los valores

en la diversidad de un agroecosistema.

Descripciones más detalladas de los índices de Shannon y de Simpson, así como los cálculos que están basados y la forma en que se relacionan con el índice de diversidad de Simpson.

que un sistema es más diverso. Una especie más dominante que cualquiera de las otras especies. Está dado por la siguiente fórmula:

Además de que los investigadores tienen más evidencias de que los cultivos intercalados proveen ventajas sustanciales en el rendimiento con respecto a los monocultivos, es importante recordar que también hay desventajas en los cultivos intercalados. Hay dificultades prácticas en el manejo de los cultivos intercalados y los aumentos de cosecha pueden deberse a efectos de interferencias adversas. En tales casos no deben usarse argumentos en contra del sistema de cultivos intercalados y en vez de esto, de

CUADRO 16.5 Valores de los índices de diversidad para los cuatro agroecosistemas hipotéticos

Índice	Monocultivo	Policultivo uniforme de dos cultivos	Policultivo uniforme de tres cultivos	Policultivo no uniforme de tres cultivos
Mergalef	0	0,40	0,81	0,81
Shannon	0	0,30	0,48	0,25
Simpson	1,0	2,01	3,02	1,41

ble de sistemas con el mismo s y N , tales como en el policultivo uniforme y heterogéneo de tres cultivos del Cuadro 16.4.

Hay otros dos índices de diversidad que consideran la uniformidad de especies y son más útiles. El **Índice de Shannon** es una aplicación de la teoría de la información, basado en la idea de que la mayor diversidad corresponde a la mayor incertidumbre en escoger aleatoriamente un individuo de una especie en particular. Este es dado por la siguiente fórmula:

$$H = \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N} \right) \left(\log_2 \frac{n_i}{N} \right)$$

donde n_i es el número de individuos en el sistema (o muestra) que pertenece a la especie "i".

El **Índice de Simpson** de diversidad es el inverso de un índice de dominancia de la comunidad con el mismo nombre. Este índice está basado en el principio de que un sistema es más diverso, cuando ninguna de las especies componentes puede ser considerada como no mas dominante que cualquiera de las otras especies. Está dado por la siguiente fórmula:

$$\text{diversidad} = \frac{N(N-1)}{\sum n_i(n_i-1)}$$

Para el Índice de Simpson, el valor mínimo es 1; para el Índice de Shannon es valor mínimo es 0. Ambos mínimos indican la ausencia de diversidad, la condición existente en un monocultivo. En teoría, el valor máximo para cada índice es limitado solamente por el número de especies y qué tan uniformemente están distribuidas en el ecosistema. Los ecosistemas naturales relativamente diversos tienen un índice de Simpson de 5 o mayor y un índice de Shannon de 3 o 4.

Los cálculos para los Índices de Mergalef, Simpson y Shannon para los sistemas hipotéticos del Cuadro 16.4, se presentan en el Cuadro 16.5. Los valores

de Shannon y Simpson muestran que un policultivo uniforme de dos cultivos, es más diverso que un policultivo de tres cultivos no-uniformes, teniendo bajos valores de importancia de uniformidad de especies en la diversidad de un agroecosistema.

Descripciones más detalladas de los Índices de Shannon y de Simpson, incluyendo la teoría en la cual están basados y la forma en que pueden ser aplicados, se encuentran en textos de ecología citados al final del Capítulo en la sección de lecturas recomendadas.

Evaluando los Beneficios de la Diversidad de Cultivos Intercalados

En una granja o parcela, una forma de determinar el valor ganado por la mayor diversidad en el sistema de cultivo, será muy útil para ayudar al productor a evaluar las ventajas y desventajas de diferentes arreglos de cultivos. Los índices de diversidad descritos anteriormente pueden cuantificar la diversidad, pero no nos pueden decir cómo esa diversidad se traduce en respuesta, o cuál es la base ecológica de cualquier mejoramiento en cuanto a la respuesta. En los sistemas de cultivo donde dos o más cultivos están muy próximos, es posible que se den varios tipos de interferencia entre las especies (como se ha descrito en los Capítulos 11 y 13), que proveen beneficios en el mejoramiento de la cosecha, reciclaje de nutrimentos, y otras más.

Además de que los investigadores tienen suficientes evidencias de que los cultivos intercalados proveen ventajas sustanciales en el rendimiento con respecto a los monocultivos, es importante reconocer que también hay desventajas en los cultivos intercalados. Hay dificultades prácticas en el manejo de los cultivos intercalados y los aumentos de cosecha pueden deberse a efectos de interferencias adversas. En tales casos no deben usarse argumentos en contra del sistema de cultivos intercalados y en vez de esto se

CUADRO 16.5 Valores de los índices de diversidad para los cuatro agroecosistemas hipotéticos

Índice	Monocultivo	Policultivo uniforme de dos cultivos	Policultivo uniforme de tres cultivos	Policultivo no uniforme de tres cultivos
Mergalef	0	0,40	0,81	0,81
Shannon	0	0,30	0,48	0,25
Simpson	1,0	2,01	3,02	1,41

terminar las necesidades de investigación que eviten estos problemas.

El Uso Equivalente de la Tierra

Una herramienta útil para el estudio y evaluación de sistemas de cultivos intercalados, es el Uso Equivalente de la Tierra (UET) (conocido en inglés como Land Equivalent Ratio (UER)). El UET provee una medida de "que todas las cosas han de ser igual", en las ventajas del rendimiento obtenido por sembrar dos o más cultivos intercalados, comparados con los mismos cultivos sembrados en forma separada como monocultivos. El UET nos permite ir más allá de una descripción del patrón de diversidad en un análisis de las ventajas de cultivos intercalados.

El uso equivalente de la tierra es calculado usando la fórmula:

$$LER = \sum \frac{Yp_i}{Ym_i}$$

donde Yp es la cosecha de cada cultivo en un sistema intercalado o en policultivo y Ym es la cosecha de cada cultivo *per se* o en monocultivo. Para cada cultivo (i) una tasa o razón es calculada para determinar el UET parcial para cada cultivo, entonces los UET parciales son sumados para dar el UET total para el sistema intercalado o policultivo. Un ejemplo de cómo calcular el UET se muestra en el Cuadro 16.6.

Un valor de UET de 1.0 significa que "no hay diferencias", indica que no hay diferencia en la cosecha del sistema intercalado o policultivo y la colección de monocultivos. Cualquier valor mayor que 1 indica una ventaja para el intercalado, y es denominado **sobrerrendimiento**. La dimensión del sobrerrendimiento es dada directamente por el valor de UET: por ejem-

plo, un valor de UET de 1.2, indica que el área sembrada en monocultivo necesitaría ser 20% mayor que el área sembrada como sistema intercalado para producir la misma cosecha combinada. Un UET de 2.0 significa que los monocultivos requieren el doble de tierra para producir la misma cosecha que si estuvieran intercalados.

Aplicación e Interpretación del Uso Equivalente de la Tierra

Ya que los valores totales y parciales de UET son proporciones y no valores reales de rendimiento, son útiles para comparar diversas mezclas de cultivos. Es decir, el UET mide el nivel de interferencia de cultivos intercalados en un sistema de cultivo.

Teóricamente, si la característica agroecológica de cada cultivo en la mezcla es exactamente la misma, al sembrarlos juntos deben tener el mismo rendimiento que si se sembraran por separado, donde cada cultivo contribuye con una proporción igual para la cosecha total. Por ejemplo, si dos cultivos similares son sembrados juntos, el UET total debe ser 1,0 y el UET parcial debe ser 0,5 para cada uno. En muchas mezclas, sin embargo, obtenemos un UET mayor que 1,0 y un valor de UET parcial, proporcionalmente mayor que el que se obtendría si cada cultivo fuera agroecológicamente igual a los demás. Un UET total mayor que 1,0 indica la presencia de interferencia positiva entre los cultivos que componen la mezcla, y puede significar también que cualquier interferencia interespecífica existente en la mezcla, no es tan negativa como la que existe en monocultivos. Probablemente, en la combinación de cultivos o mezcla de ellos se evita la competencia o se comparten recursos.

Cuando el UET total es mayor de 1,5, o cuando el UET parcial de al menos un miembro de la combina-

ción es mayor que 1,0 hay una fuerte evidencia de que la interferencia negativa es mínima en las interacciones de cultivos intercalados y que la interferencia positiva permite, al menos a un miembro de la combinación, ser mejor que si estuviera sembrado en monocultivo.

CUADRO 16.6 Datos para representar el cálculo de UET

	Rendimiento en policultivo (Yp), kg/ha	Rendimiento en monocultivo (Ym), kg/ha	UET Parcial $\left(\frac{Yp_i}{Ym_i} \right)$
Cultivo A	1000	1200	0,83
Cultivo B	800	1000	0,80
			$\sum \frac{Yp_i}{Ym_i} = 1,63$

El cultivo intercalado tradicional de maíz-frijol-calabaza, discutido en el Capítulo 15 – con un UET total de 1,97 – constituye un buen ejemplo de esta situación (Cuadro 15.3). El componente maíz del sistema tiene un UET parcial de 1,50, lo que significa que produce mejor en combinación que en monocultivo. La interferencia positiva responsable de este resultado puede ser la conexión mutualística de micorrizas entre el maíz y el frijol, o una modificación del hábitat hecha por la calabaza que estimula la presencia de insectos benéficos y la reducción de las plagas. Aunque el UET parcial del frijol y la calabaza fue muy baja (0,15 y 0,32 respectivamente), su presencia indiscutiblemente fue importante para estimular el rendimiento de maíz.

Cuando el UET total es menor que 1,0, probablemente ocurre interferencia negativa, especialmente si los UET de los cultivos que conforman la mezcla de cultivos disminuyen en forma igual. En este caso la combinación de cultivos provee desventaja en el rendimiento comparado con el monocultivo.

Cuando se analiza la UET total y las UET parciales, puede presentarse confusión sobre qué constituye un ventaja y de qué magnitud es esa ventaja. Para evitar confusiones se requiere reconocer cuáles circunstancias diferentes sugieren criterios para evaluar las ventajas del intercalamiento de cultivos. Existen al menos tres situaciones básicas (Willey, 1981):

1. *Cuando la cosecha combinada de los cultivos intercalados debe exceder la cosecha del cultivo de mayor rendimiento como monocultivo.* Esta situación puede existir cuando se evalúan las combinaciones de cultivos muy similares, tales como mezclas de pastos o forrajes, o mezclas de genotipos de un solo cultivo, tales como multilíneas del cultivo de trigo. En estos casos, las UET parciales no son tan importantes para determinar ventajas, siempre y cuando la UET total sea mayor que 1,0, ya que el requerimiento del productor es principalmente un rendimiento máximo, sin importar de cual sistema de cultivo se obtiene esa ventaja. La ventaja cuantitativa es el grado en el cual la cosecha combinada es aumentada y el UET total excede a 1,0, comparado con la cosecha del monocultivo de mayor rendimiento.

2. *Cuando los cultivos intercalados deben producir el rendimiento máximo del cultivo "principal" más un rendimiento adicional de un segundo cultivo.* Esta situación ocurre cuando la necesidad principal es de algún cultivo básico o de un cultivo de importancia comercial. De aquí que debe haber una ventaja en la combinación de los cultivos intercalados, el UET debe exceder 1,0 y el UET parcial del cultivo principal, debe estar muy cerca de 1,0 o más alto. Con el énfasis en un cultivo clave, las plantas asociadas deben generar alguna interferencia positiva en la combinación. La combinación de cultivos de maíz-frijol-calabaza mencionado anteriormente, es un buen ejemplo de esta situación, porque el productor está interesado principalmente en la cosecha de maíz. Si obtiene alguna cosecha adicional de frijol o de calabaza, aunque la UET parcial sea muy baja, es visto como un bono de cosecha adicional además del maíz. La ventaja cuantitativa es el grado al cual el cultivo principal es estimulado más allá de lo esperado como monocultivo.

3. *Cuando la cosecha combinada de los cultivos en mezcla debe exceder la cosecha de un solo cultivo.* Esta situación ocurre cuando el productor necesita ambos o todos los cultivos que conforman el sistema, especialmente cuando el área que posee para la producción es limitada. Para que la combinación de cultivos sea ventajosa, el UET total debe ser mayor que 1,0, pero ningún cultivo puede sufrir una gran reducción en su UET parcial en el proceso agrícola. Definitivamente no debe haber ninguna interferencia negativa que sea benéfica para la combinación de los cultivos. Esta situación puede presentar problemas en el uso del valor del UET, ya que no siempre está claro en qué proporción de los cultivos solos se puede basar la UET total. Las comparaciones no pueden ser hechas sólo en las proporciones sembradas, porque la interferencia en la situación de cultivos intercalados puede a menudo tener rendimientos muy diferentes a los de la proporción de monocultivo, y esto lleva a tener un sesgo en las UET parciales.

Reconocer situaciones diferentes es importante por dos razones. Primero, ayuda a asegurar que la investigación de una combinación dada esté basada en

prácticas de campo reales. Segundo, puede asegurarse que las ventajas en los rendimientos sean evaluados de una forma real y cuantitativa, que sean apropiados para cada situación. Definitivamente, el patrón o arreglo de la combinación de cultivos que mejor funciona es aquella que contiene tanto el criterio del productor como del investigador.

Para poner cultivos diferentes en una base que los haga más comparables, pueden usarse variables diferentes al rendimiento para calcular el UET (Trenbath 1974). Estas variables incluyen contenido de proteína, biomasa total, contenido de energía, contenido de nutrientes digestibles, o valor monetario. Estos cálculos permiten el uso de indicadores similares para evaluar las diferentes contribuciones que un cultivo puede hacer al agroecosistema.

COLONIZACIÓN Y DIVERSIDAD

Hasta este punto hemos explorado cómo el productor puede aumentar directamente la diversidad sembrando más especies, y cómo él o ella pueden crear condiciones que permitan una diversificación "natural" en un agroecosistema. Hemos ignorado la pregunta de ¿cómo organismos que no son sembrados por el productor entran al sistema y se establecen por sí solos?. Esta pregunta se relaciona tanto con organismos deseables, que son estimulados – tales como depredadores y parásitos de herbívoros, organismos benéficos del suelo y arvenses útiles alelopáticas – como son los organismos no deseables, tales como herbívoros, que el productor desearía excluir del sistema.

Para enfocar la pregunta de ¿cómo un agroecosistema es colonizado por organismos?, es útil pensar que el cultivo es como una "isla" rodeada por un "océano", que los organismos tienen que cruzar para ser parte de la diversidad de especies del agroecosistema. En el sentido ecológico, cualquier ecosistema aislado rodeado por ecosistemas diferenciados es una isla, porque los ecosistemas aledaños establecen límites a la capacidad de los organismos para llegar y colonizar esa isla.

Tomando en cuenta nuestro estudio sobre los procesos de dispersión y establecimiento en el Capítulo 13, exploraremos cómo el estudio de la colonización de islas reales puede ser aplicado para entender la colonización de los agroecosistemas y cómo este proceso está relacionado con la diversidad de los agroecosistemas.

Teoría de la Biogeografía de Islas

El cuerpo de la teoría ecológica relacionada con islas es conocido como biogeografía de islas (MacArthur y Wilson 1967). Esta teoría empieza con la idea de que los ecosistemas de las islas, generalmente están muy aislados de otros ecosistemas similares. La secuencia de eventos que permite a un organismo llegar a una isla, establece una serie de respuestas que guían el desarrollo del ecosistema isla. Una característica de las islas es que muchas de las interacciones que eventualmente determinan el nicho actual de cada organismo después que llega a la isla, son muy diferentes de las condiciones del nicho que tuvo anteriormente ese organismo. Esta situación da al organismo una oportunidad para ocupar más de su nicho potencial, o aún evoluciona características que pueden permitirle expandirlo a un nuevo nicho. Esto es especialmente verdadero en el caso de una isla recientemente formada en el océano – un ambiente muy similar al recientemente perturbado (ejemplo, paso del arado) campo agrícola. La primera plaga que llega a un campo "no colonizado" tiene la oportunidad de llenar rápidamente el nicho potencial, especialmente si es una plaga especialista, adaptada a las condiciones del cultivo presente en ese campo.

La teoría de biogeografía de islas ofrece métodos para predecir el resultado del proceso de diversificación en una isla. Estos métodos consideran el tamaño de la isla, la efectividad de las barreras que limitan la dispersión hacia la isla, la variabilidad de los hábitats en ella, la distancia entre la isla y las fuentes de emigración y el periodo de tiempo en que la isla ha estado aislada.

Manipulaciones experimentales de sistemas de islas (Simberloff y Wilson 1969) y estudios sobre diversidad de islas, proveen las bases para los siguientes principios:

- Mientras más pequeña sea la isla, los organismos requieren más tiempo para encontrarla.
- Mientras más lejos esté la isla de sus colonizadores, los organismos requieren más tiempo para colonizarla.
- Islas más pequeñas y más distantes tienen una flora y fauna menos diversa
- En las islas muchos nichos pueden estar desocupados.
- Muchos de los organismos que llegan a las islas ocupan nichos más amplios que los mismos organismos o similares en tierra firme.

- Los primeros colonizadores generalmente llegan antes que los depredadores y parásitos limitantes, y pueden experimentar un rápido crecimiento al principio.
- Así como la colonización avanza, ocurren cambios en la estructura del nicho de la isla, y puede darse la extinción de los primeros colonizadores.
- Los primeros colonizadores son principalmente organismos de selección "r".

Definitivamente, la teoría puede ser capaz de predecir posibles tasas de colonización y extinción de una isla en particular. Tales predicciones pueden hacer posible el entendimiento de las relaciones entre condiciones ecológicas y la diversidad potencial de especies, y los factores que controlan el establecimiento de un equilibrio entre extinción y la posterior colonización.

Aplicaciones Agrícolas

La similitud entre islas y cultivos permite a los investigadores aplicar la teoría de biogeografía de islas en la agricultura. Se pueden diseñar experimentos donde el cultivo puede estar completamente rodeado por un cultivo diferente, o pequeñas parcelas marcadas en un campo más amplio del mismo cultivo. Uno de los estudios pioneros fue realizado por Price (1976) sobre las tasas de plagas y enemigos naturales que colonizan plantaciones de soya. El estudio fue realizado usando pequeñas parcelas en un campo de soya como islas experimentales; las parcelas estaban rodeadas por un "océano" de soya, con un bosque a un lado y más cultivo de

soya en los otros lados. Se muestrearon parcelas pequeñas durante todo el ciclo del cultivo de soya. Las parcelas estaban localizadas a diferentes distancias de varias fuentes de colonización, permitiendo así medir las tasas de llegada, abundancia y diversidad tanto insectos plaga como agentes benéficos de control. Las plagas de más fácil dispersión fueron las primeras en llegar al interior de las parcelas, y fueron seguidas posteriormente por algunos de sus parásitos y depredadores. El equilibrio entre las especies y los individuos, tanto plagas como enemigos naturales, que fue pronosticado por la teoría de biogeografía de islas no fue obtenido, probablemente debido a lo corto del ciclo de vida del cultivo de soya. Este estudio ha estimulado otros estudios de naturaleza similar (Altieri 1995b).

Usando los conceptos desarrollados en la teoría de biogeografía de islas, puede manipularse "la isla" en sistemas de cultivo, de tal manera que se pueda disminuir la llegada de plagas o estimular la presencia de organismos benéficos. Tal enfoque tiene potencial para trabajar con insectos, arvenses y enfermedades. Idealmente, queremos alcanzar el punto donde podamos predecir la estructura de la población y como resultado, usar tal información para determinar el mejor tamaño del área de cultivo, su arreglo en el paisaje, y la distancia entre cultivos semejantes, el periodo efectivo de separación entre campos, y como éste es afectado por los tipos de cultivos y otra vegetación en las áreas entre los cultivos de importancia. Una vez más, estamos tratando con un complejo grupo de factores, pero el potencial para usar la teoría de biogeografía de islas en un contexto agroecológico, es muy amplio.

ESTUDIO DE CASO

Efecto de Bordes de Arvenses en la Colonización de Insectos en una Plantación de Coliflor

La mayoría de los insectos que eventualmente están presentes en un cultivo vienen desde cualquier lugar. Los productores pueden tener algún grado de control sobre este proceso de colonización de insectos – influenciando tanto los tipos de insectos

que se establecen en el campo como el tamaño de sus poblaciones – manejando los alrededores del campo sembrado.

Los bordes sembrados con una especie vegetal en particular, por ejemplo, pueden atraer organismos benéficos, haciendo que ellos colonicen la "isla" del cultivo. Los bordes también pueden repelear plagas, disminuyendo, retrasando o aún previniendo su llegada al cultivo.

En un estudio realizado en la granja de la Universidad de California, Santa Cruz, el estudiante

Octavio Ruíz-Rosado aplicó este principio para el cultivo de coliflor, evaluando cómo un borde relativamente delgado de diferentes arvenses afectó la mezcla de poblaciones de insectos que colonizaron al cultivo (Ruíz-Rosado, 1984). Ruíz-Rosado sembró coliflor con diferentes bordes de arvenses de 0,5 m de ancho, alrededor de las parcelas de coliflor y mantuvo una parcela testigo sin borde de arvenses. Un tipo de borde de arvense fue mostaza silvestre (*Brassica campestris*) y rábano (*Raphanus sativus*), otra fue esparcilla (*Spergula arvensis*) y una tercera fue quelite (*Chenopodium album*).

Las parcelas fueron muestreadas para identificar la colonización de insectos plaga, insectos benéficos y parasitoides. Cada tipo de borde dio

como resultado una población de insectos muy diferente en el cultivo de coliflor. Por ejemplo, el borde de quelite redujo la incidencia del gusano falso medidor (*Trichlopusia ni*) y de la pulga saltana (*Phyllotreta cruciferae*), mientras que los bordes de mostaza silvestre y el rábano aumentaron la presencia de esos insectos plaga. Sin embargo, el rábano y la mostaza silvestre atrajeron también la mayor cantidad de insectos parasitoides benéficos, dando como resultado una mayor tasa de parasitación en áfidos o pulgones.

Estos resultados indican que los bordes de arvenses en los cultivos pueden tener un papel importante en el manejo de insectos plaga. También resalta la importancia del manejo: cada borde puede tener diferente efecto sobre diferentes plagas.



FIGURA 16.6
Mostaza silvestre
(*Brassica campestris*)
formando una barrera
alrededor de "islas" de
coliflor. La mostaza puede
atraer insectos benéficos y
retardar el movimiento hacia el
cultivo por insectos plaga
herbívoros.

DIVERSIDAD, ESTABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD

La diversidad en los agroecosistemas puede tomar muchas formas, incluyendo el arreglo específico de los cultivos en el campo, la forma en que muchos campos están ubicados, y la forma en que diferentes campos constituyen el paisaje agrícola de una región. Con el aumento de la diversidad podemos aprovechar las formas positivas de interacciones entre los elementos del agroecosistema, incluyendo tanto los elementos cultivados como los no cultivados. El reto para el agroecólogo es demostrar las ventajas que se pueden obtener introduciendo diversidad en los sis-

temas de cultivo, incorporando muchos de los componentes de la función del ecosistema que son importantes en la naturaleza, y el manejo de la diversidad a largo plazo.

En parte, conocer este reto significa determinar las relaciones entre los diferentes tipos de diversidad, discutidas en este Capítulo y la estabilidad del agroecosistema en el tiempo. Esta estabilidad debe ser entendida como la resistencia del sistema a cambiar y la elasticidad del sistema en respuesta al cambio. Ya que cada especie en el agroecosistema conlleva algo diferente al proceso que mantiene ambos tipos de estabi-

CUADRO 16.7 Preguntas de investigación relacionadas con la colonización y la teoría de biogeografía de islas

Tipo de organismo	Fuente	Variables de la barrera	Variables de la isla	Pregunta de investigación
Plaga herbívora	Cultivos de alrededor	Depende del tipo de barrera		¿Cuáles son las barreras eficaces contra la dispersión de la plaga hacia el cultivo?
Plaga herbívora	Cultivos de alrededor	Tamaño de la barrera		¿Cuál distancia entre cultivos similares puede controlar mejor la dispersión de una plaga de un campo a otro?
Arvenses no deseables	Cultivos de alrededor	Tipo, tamaño y naturaleza de la barrera (ejemplo rompevientos)		¿Cuáles son las barreras eficaces contra la dispersión de arvenses hacia el cultivo?
Depredadores de herbívoros	Cualquier lugar fuera del sistema		Hábitat para hospedantes alternos	¿Cómo puede ser estimulada la colonización por depredadores?
Organismos que causan enfermedad (patógenos)	Cultivos de alrededor		Tamaño de la isla	¿Es una pequeña isla de cultivo más difícil de localizar para un organismo patógeno?
Arvenses no deseables	Alrededor de los cultivos		Ocupación de nichos	¿Puede un nicho ocupado resistir la invasión de nuevos colonizadores?
Insectos benéficos	Cualquier lugar fuera del sistema	Barreras en franjas alrededor del cultivo		¿Se puede diversificar el área entre cultivos para atraer y retener insectos benéficos?

alidad, una parte importante de la investigación agroecológica está enfocada en el entendimiento de la contribución de cada especie y utilizar este conocimiento para integrar cada especie al sistema en el tiempo y lugar óptimo. Mientras esta integración sucede, aparecen las cualidades emergentes de la estabilidad del sistema, permitiendo la cualidad emergente más importante para el desarrollo de la sostenibilidad.

Los agroecosistemas más sostenibles deben ser aquellos que tienen algún tipo de patrón estructural y de desarrollo, en el cual el sistema es un traslape de niveles de diversidad, mezclando cultivos anuales, perennes, arbustos, árboles y animales; los sistemas más sostenibles deben ser aquellos con diferentes etapas de desarrollo, que ocurren al mismo tiempo como resultado del tipo de manejo aplicado. Tales sistemas deben incorporar labranza mínima que permita la madurez y el desarrollo del subsistema suelo, aún con el más simple sistema vegetal sobre el suelo, o usar cultivo en franjas o a las orillas, para crear mosaicos

de varios niveles de desarrollo y diversidad a lo amplio del paisaje agrícola. Una vez que los parámetros de diversidad están establecidos, el asunto viene a ser la frecuencia e intensidad del disturbio- lo cual exploraremos en el siguiente Capítulo.

Ideas para Meditar

1. Describa una estrategia de manejo de plagas basada en la teoría de biogeografía de islas.
2. Explique una situación en la cual la pérdida de diversidad de un componente del agroecosistema puede ser compensada por mayor diversidad en algún otro componente.
3. ¿Cuál es la conexión entre diversidad y el evitar riesgos en los agroecosistemas? De ejemplos para apoyar tus puntos de vista.
4. ¿Cuáles son los posibles mecanismos que permiten a un cultivo tener mayor rendimiento en una combinación de cultivos que cuando es sembrado como monocultivo?

5. ¿Cuáles son los principales desestímulos para que los productores cambien a sistemas de cultivo más diversos? ¿Qué tipo de cambios se necesitan para proveer los estímulos necesarios?
6. ¿Cuáles son algunas de las formas de diversificación del agroecosistema que promueven el éxito del Manejo Integrado de Plagas (MIP)?
7. ¿Por qué los agroecosistemas agroforestales y sistemas de cultivos intercalados o combinados son más comunes en el trópico que en las zonas templadas del mundo?

Lecturas Recomendadas

Altieri, M.A. 1994. *Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems*. Food Products Press: New York.

Una revisión del papel de la diversidad vegetal en el manejo de insectos plaga, combinando un análisis de mecanismos ecológicos y el diseño de principios para la agricultura sostenible.

Carlquist, S. 1974. *Island Biology*. Columbia University Press: New York.

Una excelente revisión de los procesos de evolución y biológicos característicos de los ecosistemas de islas.

Carson, R. 1962. *Silent Spring*. Houghton Mifflin: Boston.

El clásico llamado de alerta sobre el impacto negativo de los plaguicidas en la biodiversidad.

Golley, F. B. 1994. *A History of the Ecosystem Concept in Ecology*. Yale University Press: New Haven, CT.

Una revisión completa del desarrollo e importancia del concepto de ecosistema.

Ricklefs, R.E. 1997. *The Economy of Nature*. 4th Edition. W.H. Freeman and Company: New York.

Una revisión del campo de la ecología que enlaza los principios básicos con el entendimiento de los problemas ambientales.

Schulze, E.D. y H.A. Mooney (eds). 1994. *Biodiversity and Ecosystem Function*. Springer Study Edition. Springer-Verlag: Berlin.

Un documento excelente de cómo la pérdida de biodiversidad está afectando globalmente los procesos de ecosistemas.

Smith, R.L. 1995. *Ecology and Field Biology*. 5th Edition. Harper Collins College Publishers: New York.

Un texto de ecología general que provee una revisión de la disciplina ecológica con excelentes aplicaciones de campo.

Wilson, E.O. (ed). 1988. *Biodiversity*. National Academy Press: Washington, D.C.

Una colección de 38 trabajos de autores reconocidos acerca del valor de la biodiversidad y la importancia de conservarla y su restauración.

PERTURBACIÓN, SUCESIÓN Y MANEJO DE AGROECOSISTEMAS

Los conceptos ecológicos de perturbación y recuperación, mediante la sucesión, tienen una aplicación importante en agroecología. Los agroecosistemas están siendo alterados constantemente por la preparación y mantenimiento del suelo, siembra, irrigación, fertilización, manejo de plagas, podas, cosecha y quemas. Cuando la perturbación es frecuente, amplia e intensa -como se da en la agricultura convencional- los agroecosistemas se mantienen en estados de sucesión temprana. Esta condición permite alta productividad, pero requiere de la aplicación de grandes cantidades de fertilizantes y plaguicidas. Además, con el tiempo tiende a degradar el recurso suelo.

La producción de alimentos más sostenible puede lograrse si abandonamos la dependencia de las perturbaciones excesivas y continuas, y permitimos que los procesos sucesionales generen mayor estabilidad en el agroecosistema. Con base en el entendimiento de la sucesión y la perturbación en ecosistemas naturales, podemos mejorar la capacidad de los agroecosistemas de mantener la fertilidad y la productividad mediante un manejo adecuado de la perturbación y la recuperación.

PERTURBACIÓN Y RECUPERACIÓN EN ECOSISTEMAS NATURALES

Una de las premisas antiguas de la ecología plantea que un ecosistema, después de una perturbación, comienza inmediatamente un proceso de recuperación en reacción a esa alteración. La recuperación se da mediante el proceso, relativamente ordenado, de la sucesión, el cual fue mencionado en el Capítulo 2. En términos generales, la sucesión ecológica es el proceso de desarrollo de un ecosistema, mediante el cual se dan cambios específicos en la estructura y la función de la comunidad ecológica en el tiempo.

Los ecólogos distinguen dos tipos básicos de sucesión. La **sucesión primaria** representa el desarrollo del ecosistema en sitios que: 1) no fueron ocupados previamente por organismos vivos (como rocas, superficies congeladas, o islas volcánicas recientemente formadas); o 2) no fueron sujetos de los cambios que pueden ejercer los componentes bióticos sobre los abióticos. La **sucesión secundaria** es el desarrollo de un ecosistema en sitios que fueron previamente ocupados por organismos vivos, pero que sufrieron disturbios por algún evento como fuego, inundación, vientos fuertes, o pastoreo intensivo. Dependiendo de la intensidad, frecuencia y duración de la perturbación, el impacto sobre la estructura y función del ecosistema varía, así como el tiempo requerido para la recuperación. Ya que los procesos de perturbación y recuperación que ocurren en la agricultura se dan, generalmente, en sitios previamente ocupados por otros componentes bióticos, esta discusión se enfoca hacia el proceso de la sucesión secundaria.

La Naturaleza de la Perturbación

Aunque los ecosistemas naturales dan la impresión de ser estables e inmutables, la realidad es que siempre están siendo alterados, en alguna medida, por eventos como el fuego, tormentas, inundaciones, temperaturas extremas, epidemias, árboles caídos, deslaves y erosión. Estos eventos perturban los ecosistemas, matando organismos, destruyendo y modificando hábitats y cambiando las condiciones abióticas. Cualquiera de estos impactos puede cambiar la estructura de un ecosistema natural y modificar los niveles de población de los organismos y la biomasa que almacenan.

Los perturbaciones pueden variar en tres dimensiones:

- *La intensidad de la perturbación puede determinarse por la cantidad de biomasa removida o por el número de individuos muertos. Los tres tipos de fuego descritos en el Capítulo 10, proveen buenos ejemplos de variación en la intensidad de una perturbación: los fuegos superficiales generalmente crean perturbaciones de baja intensidad, mientras que los fuegos a mayor profundidad causan perturbaciones de alta intensidad.*
- *La frecuencia de la perturbación es el tiempo promedio entre cada evento que causa perturbación. Entre más largo sea el tiempo entre perturbaciones, mayor es la capacidad del ecosistema para recuperarse después de cada per-*

...Durante el proceso de recuperación, muchos cambios importantes ocurren en el ecosistema. Estos son más fáciles de observar en una perturbación relativamente severa. El Cuadro 17.1 resume algunas de las etapas más importantes del proceso de recuperación de una perturbación. Las primeras etapas son dominadas por especies de crecimiento rápido y de fácil dispersión. Con el tiempo, las especies de crecimiento lento y de dispersión limitada se vuelven dominantes.

El Proceso de Recuperación

Cualquier cambio o alteración del ecosistema por la perturbación, es seguido por un proceso de recuperación. La *recuperación ocurre mediante la acción*

combinada de varias dinámicas del ecosistema: (1) toda la comunidad biótica modifica el ambiente físico mediante muchas formas de interferencia descritas

en el Capítulo anterior; (2) la competencia y coexistencia entre organismos individuales y poblaciones causa cambios en la diversidad y abundancia de las especies; y (3) el flujo de energía cambia de producción a respiración, conforme se necesita más energía en el sistema para apoyar el aumento de la biomasa en pie. La interacción de estos procesos lleva a un ecosistema en recuperación, a través de una serie de

implicaciones agroecológicas. Con el tiempo, de biomasa y de nutrientes del cultivo en pie, especialmente en la

etapas de la sucesión. Como la biomasa es gradualmente convertida en detrito y humus, cada vez que los organismos descomponedores actúan, este incremento en biomasa provoca indirectamente un incremento en la materia orgánica del suelo.

Durante las primeras etapas de la recuperación, existe gran disponibilidad de nutrientes, acompañada de la conservación relativamente ineficiente de es-

- *La intensidad de la perturbación* puede determinarse por la cantidad de biomasa removida o por el número de individuos muertos. Los tres tipos de fuego descritos en el Capítulo 10, proveen buenos ejemplos de variación en la intensidad de una perturbación: los fuegos superficiales generalmente crean perturbaciones de baja intensidad, mientras que los fuegos a mayor profundidad causan perturbaciones de alta intensidad.
- *La frecuencia de la perturbación* es el tiempo promedio entre cada evento que causa perturbación. Entre más largo sea el tiempo entre perturbaciones, mayor será la capacidad del ecosistema para recuperarse completamente después de cada perturbación.
- *La escala de la perturbación* se refiere a la magnitud espacial de la perturbación, la cual puede variar desde un pequeño fragmento localizado, hasta el paisaje completo. La pequeña apertura en el dosel del bosque, creado por la caída de un árbol, es una perturbación a pequeña escala, mientras que la destrucción masiva causada por un huracán poderoso tiene una escala muy grande.

Las tres características de perturbación mencionadas están regularmente interrelacionadas en formas complejas. El fuego, por ejemplo, puede ocurrir con una frecuencia muy variable; puede tener una distribución a través del paisaje por parches; y donde ocurre, puede quemar algunas áreas intensivamente y dejar otras casi sin quemar.

El Proceso de Recuperación

Cualquier cambio o alteración del ecosistema por la perturbación, es seguido por un proceso de recuperación. La recuperación ocurre mediante la acción combinada de varias dinámicas del ecosistema: (1) toda la comunidad biótica modifica el ambiente físico mediante muchas formas de interferencia descritas en el Capítulo anterior; (2) la competencia y coexistencia entre organismos individuales y poblaciones causa cambios en la diversidad y abundancia de las especies; y (3) el flujo de energía cambia de producción a respiración, conforme se necesita más energía en el sistema para apoyar el aumento de la biomasa en pie. La interacción de estos procesos lleva a un ecosistema en recuperación, a través de una serie de

fases de desarrollo (llamadas originalmente estados seriales). Eventualmente, este desarrollo da como resultado una estructura y un nivel de complejidad del ecosistema similar al que existía antes de que ocurriera la perturbación.

Durante el proceso de recuperación, ocurren muchos cambios importantes en la estructura y función del ecosistema. Estos son más evidentes después de una perturbación relativamente severa y extensa. El Cuadro 17.1 resume algunas de las características más importantes del proceso de sucesión después de una perturbación. Las primeras fases de la sucesión son dominadas por especies de selección *r*, que son invasores de fácil dispersión. Conforme estos primeros invasores cambian las condiciones del ambiente, son desplazados por la interferencia de especies que se establecen después, las especies de selección *K* comienzan a dominar. El reemplazo de plantas y animales por otros, en el tiempo, ha sido observado comúnmente durante el período de recuperación (ejemplo, Keever 1950, Gómez-Pompa y Vásquez Yanez 1981).

La mayoría de los componentes de la diversidad ecológica (descritos en el Capítulo anterior) se incrementan durante la sucesión, especialmente en las primeras fases y generalmente alcanzan su nivel máximo antes de la recuperación completa. El hecho de que la fotosíntesis bruta excede, en gran medida, la respiración total durante las primeras fases de la sucesión, tiene gran importancia agroecológica. Esto se debe a la alta productividad primaria neta y al gran potencial de cosecha que resultan de estos procesos. Sin embargo, conforme el cultivo en pie se incrementa con el desarrollo sucesional, se utiliza mayor proporción de la productividad para el mantenimiento, lo cual crea la impresión de una mayor estabilidad.

Otro aspecto del desarrollo sucesional que tiene implicaciones agroecológicas importantes es el incremento, en el tiempo, de biomasa y de materia orgánica del cultivo en pie, especialmente en las primeras etapas de la sucesión. Como la biomasa es eventualmente convertida en detrito y humus, conforme los organismos descomponedores actúan, este incremento en biomasa provoca indirectamente un incremento en la materia orgánica del suelo.

Durante las primeras etapas de la recuperación existe gran disponibilidad de nutrimentos, acompañada de la conservación relativamente ineficiente de

CUADRO 17.1 Cambios en la estructura y función de un ecosistema durante el curso de la sucesión secundaria, que ocurre después de una perturbación significativa

Características del Ecosistema	Cambios durante el proceso de sucesión*		
	Etapas iniciales	Etapas medias	Madurez
Composición de especies	Reemplazo rápido de especies	Reemplazo más lento de especies	Poco cambio
Diversidad de especies	Baja, con incremento rápido	Media, con incremento rápido	Alta, con una posible disminución pequeña
Biomasa total	Baja, con incremento rápido	Media, con incremento moderado	Alta, con una tasa lenta de incremento
Cantidad de materia orgánica muerta	Baja, con incremento rápido	Media, con incremento moderado	Alta, con una tasa de incremento lenta
Productividad primaria bruta	Incremento rápido		Disminuye un poco
Productividad primaria neta	Incrementa rápidamente		Disminuye un poco
Respiración del sistema	Incremento		Incremento lento
Cadena alimenticia	Se vuelven más complejas		Se mantienen complejas
Interacciones entre especies	Se vuelven más complejas		Se mantienen complejas
Eficiencia del uso de nutrientes y energía	Incremento		Se mantiene eficiente
Reciclaje de nutrientes	Fluye; ciclos abiertos	→	Reciclaje interno; ciclos cerrados
Retención de nutrientes	Retención baja; tiempo corto de retorno	→	Retención alta; tiempo largo de retorno
Forma de crecimiento	Especies de selección <i>r</i> ; especies de crecimiento rápido	→	Especies de selección <i>K</i> de vida larga
Amplitud del nicho	Generalistas	→	Especialistas
Ciclos de vida	Anuales	→	Perennes
Interferencia	Más que todo competitiva	→	Más mutualístico

* Aunque algunos cambios se presentan en etapas ordenadas, todos ocurren como transformaciones graduales.

Adaptado de Odum (1993).

tos elementos. Especies de plantas “ruderales”, de rápido crecimiento, pronto se vuelven dominantes y la interacción entre poblaciones se limita a las pocas especies presentes. Conforme la sucesión progresa, la retención de nutrientes mejora, y las especies colonizadoras comienzan a ocupar mayor diversidad de nichos en el sistema. Además, las interacciones entre poblaciones se incrementan (especialmente las interacciones relacionadas con la asignación de recursos y la interferencia mutualística), y la estructura del ecosistema se vuelve más compleja e interrelacionada.

Si se permite que pase suficiente tiempo después de una perturbación, un ecosistema eventualmente alcanza un punto (anteriormente este punto era referido como la etapa de “clímax”) donde las tasas y la naturaleza de los cambios de la mayoría de las características, presentadas en el Cuadro 17.1, dejan de ser significativas. Por ejemplo, en términos de la diversidad de especies, el número de especies colonizadoras equivale al número de especies emigrantes o aquellas que se extinguen. Las pérdidas de nutrientes son balanceadas con insumos externos al sistema. Los niveles de las poblaciones fluctúan estacionalmente,

pero se mantienen relativamente constantes. En esta etapa, el sistema está otra vez en ligero equilibrio con el clima regional y las condiciones locales de suelo, topografía y disponibilidad de agua. Los cambios continúan ocurriendo, pero ya no representan un cambio de dirección y desarrollo, sino un cambio que se orienta hacia un punto de equilibrio. En el Capítulo 2, describimos dicha condición como un *equilibrio dinámico*, un concepto que considera que todos los ambientes están cambiando y evolucionando constantemente, siempre ocurriendo nuevas perturbaciones, aún cuando sean a pequeña escala.

Entonces, en un ecosistema maduro típico, algunos sitios localizados son devueltos a etapas más iniciales de sucesión regularmente, pero las características presentadas en el Cuadro 17.1, se han desarrollado lo suficiente como para que la utilización de nutrimentos y energía sea más eficiente, las cadenas alimenticias complejas y las relaciones mutualísticas prevalentes. El sistema es relativamente estable en dos sentidos, es capaz de resistir los cambios, además de tener resiliencia cuando ocurre la perturbación. Por lo tanto, los eventos de la perturbación que ocurren no provocan un cambio drástico, pero tampoco permiten una condición de "estado-fijo".

Perturbaciones Intermedias

En algunos ecosistemas, la frecuencia, la intensidad y la escala de las perturbaciones es tal, que el sistema nunca alcanza la madurez total. Aun así, el ecosistema mantiene la diversidad de especies, la estabilidad y la eficiencia en el uso de la energía como un ecosistema maduro. Los ecólogos que estudian estos sistemas han postulado la **hipótesis de perturbación intermedia**, la cual propone que en ecosistemas naturales, donde las perturbaciones ambientales no son, ni muy frecuentes ni muy raras (con frecuencia intermedia), la diversidad y la productividad pueden ser muy grandes (Connell 1978, Connell y Slayter 1977). La perturbación en estos sistemas

mantiene las características de gran productividad asociadas a la sucesión temprana. Además, la estabilidad del sistema permite una gran diversidad de especies que caracteriza a ecosistemas más maduros.

Algunos ecosistemas naturales en los cuales podría aplicarse la hipótesis de la perturbación intermedia se presentan en el Cuadro 17.2. El análisis de estos sistemas revela que la perturbación intermedia puede ocurrir en gran diversidad de combinaciones de frecuencia, intensidad y escala de la perturbación. Por ejemplo, perturbaciones relativamente frecuentes e intensas a pequeña escala, pueden tener un efecto similar a perturbaciones, con escasa frecuencia e intensidad, pero que ocurren a mayor escala.

En muchas situaciones de perturbaciones intermedias, éstas se distribuyen irregularmente en el paisaje, en el tiempo y en el espacio, provocando lo que se conoce como un **paisaje fragmentado**. En este tipo de paisaje se presentan numerosas etapas de la sucesión, de manera simultánea en un área relativamente pequeña. La variación en el estado de desarrollo de un parche a otro, contribuye al mantenimiento de una considerable diversidad a nivel de ecosistema. Por lo tanto, la **fragmentación** sucesional puede considerarse como un aspecto de las dinámicas ecológicas presentes en los ecosistemas. El tamaño del fragmento, la variación en el desarrollo de éste, y la naturaleza de las áreas de traslape entre fragmentos, se vuelven variables importantes a nivel del paisaje. En los últimos años, se han invertido considerables recursos en estudios ecológicos que intentan comprender el papel de estas variables en los ecosistemas naturales (Pickett y White 1995). La inherente fragmentación de muchos

CUADRO 17.2 Algunos ejemplos de perturbaciones intermedias en ecosistemas naturales

Frecuencia	Escala	Intensidad	Naturaleza de la perturbación
Alta	pequeña	baja	Arboles derribados por el viento (natural)
Baja	grande	alta	Daño ocasionado por un huracán en un arrecife de coral o en un bosque tropical
Alta	costero mediana	baja	Remoción de biomasa por el pastoreo de herbívoros en áreas de pastizales
Media	mediana	media	Daño causado por hielo o granizo a los árboles de bosques templados
Media	mediana	baja	Fuegos superficiales en bosques secos tropicales

pasajes agrícolas indica la posible aplicación de los conceptos de fragmentación y perturbaciones intermedias en el manejo de los agroecosistemas.

APLICACIONES AL MANEJO DE AGROECOSISTEMAS

La agricultura moderna ha desarrollado una serie de prácticas, tecnologías e insumos que permiten que los agricultores ignoren la mayoría de los procesos sucesionales. En lugar de la recuperación natural, los agricultores utilizan insumos y materiales que reemplazan lo que fue removido por la cosecha, o mediante el manejo. La perturbación constante mantiene al agroecosistema en las etapas iniciales de la sucesión, donde una mayor proporción de la productividad bruta está disponible como productividad neta o biomasa cosechable. Sin embargo, para desarrollar sistemas más estables, que sean mucho menos dependientes de las intervenciones humanas y de insumos contaminantes y no renovables, debemos hacer mucho más que aprovechar los procesos de recuperación natural de los ecosistemas. Nuestro conocimiento sobre el proceso sucesional en ecosistemas naturales, puede utilizarse para facilitar la recuperación de agroecosistemas que han sufrido impactos causados por perturbaciones originadas por los humanos. De igual manera, esta información sirve para planificar la introducción de perturbaciones en una forma controlada.

Expuesta de manera simple, la tarea consiste en diseñar agroecosistemas, que por un lado aprovechan algunos de los atributos benéficos de las etapas de la sucesión inicial y a la vez, incorporen las ventajas obtenidas al permitir que el sistema alcance las etapas sucesionales posteriores. Como se muestra en el Cuadro 17.3, en la etapa de sucesión inicial sólo se da una característica agroecológica deseable, una productividad primaria neta alta. Todas las características deseables restantes no se manifiestan hasta en las etapas posteriores de la sucesión.

El desafío para la investigación es desarrollar formas de integrar la perturbación y el desarrollo, de manera que se aprovechen las ventajas de los dos extremos. Para ello, se debe aprender a usar los procesos sucesionales, para instalar y desarrollar un agroecosistema, así como para reintroducir la perturbación y la recuperación en los momentos apropiados durante la vida del sistema.

Permitiendo el Desarrollo Sucesional

Por mucho tiempo, la agricultura ha tomado ventaja de la perturbación para mantener los sistemas agrícolas en etapas iniciales de la sucesión. Esto se da especialmente en los sistemas de cultivos anuales, donde no se permite que ninguna parte del ecosistema alcance etapas más avanzadas que los estados iniciales de desarrollo.

CUADRO 17.3 Características ecológicas deseables de los agroecosistemas, en relación con el desarrollo sucesional

Característica	Etapa sucesional de mayor desarrollo			Beneficio al agroecosistema
	Temprana	Mediana	Tardía	
Diversidad de especies alta				Riesgo reducido de una pérdida catastrófica de cultivos
Biomasa total alta				Fuente sustancial de materia orgánica del suelo
Productividad primaria neta alta				Mayor potencial para la producción de biomasa cosechable.
Complejidad de la interacción de especies				Mayor potencial para el control biológico
Eficiente reciclaje de nutrientes				Menor necesidad de nutrimentos en forma de insumos externos
Interferencia mutualística				Mayor estabilidad; menor necesidad de insumos externos

paisajes agrícolas indica la posible aplicación de los conceptos de fragmentación y perturbaciones intermedias en el manejo de los agroecosistemas.

APLICACIONES AL MANEJO DE AGROECOSISTEMAS

La agricultura moderna ha desarrollado una serie de prácticas, tecnologías e insumos que permiten que los agricultores ignoren la mayoría de los procesos sucesionales. En lugar de la recuperación natural, los agricultores utilizan insumos y materiales que reemplazan lo que fue removido por la cosecha, o mediante el manejo. La perturbación constante mantiene al agroecosistema en las etapas iniciales de la sucesión, donde una mayor proporción de la productividad bruta está disponible como productividad neta o biomasa cosechable. Sin embargo, para desarrollar sistemas más estables, que sean mucho menos dependientes de las intervenciones humanas y de insumos contaminantes y no renovables, debemos hacer mucho más que aprovechar los procesos de recuperación natural de los ecosistemas. Nuestro conocimiento sobre el proceso sucesional en ecosistemas naturales, puede utilizarse para facilitar la recuperación de agroecosistemas que han sufrido impactos causados por perturbaciones originadas por los humanos. De igual manera, esta información sirve para planificar la introducción de perturbaciones en una forma controlada.

Expuesta de manera simple, la tarea consiste en diseñar agroecosistemas, que por un lado aprovechan algunos de los atributos benéficos de las etapas de la sucesión inicial y a la vez, incorporen las ventajas obtenidas al permitir que el sistema alcance las etapas sucesionales posteriores. Como se muestra en el Cuadro 17.3, en la etapa de sucesión inicial sólo se da una característica agroecológica deseable, una productividad primaria neta alta. Todas las características deseables restantes no se manifiestan hasta en las etapas posteriores de la sucesión.

El desafío para la investigación es desarrollar formas de integrar la perturbación y el desarrollo, de manera que se aprovechen las ventajas de los dos extremos. Para ello, se debe aprender a usar los procesos sucesionales, para instalar y desarrollar un agroecosistema, así como para reintroducir la perturbación y la recuperación en los momentos apropiados durante la vida del sistema.

Permitiendo el Desarrollo Sucesional

Por mucho tiempo, la agricultura ha tomado ventaja de la perturbación para mantener los sistemas agrícolas en etapas iniciales de la sucesión. Esto se da especialmente en los sistemas de cultivos anuales, donde no se permite que ninguna parte del ecosistema alcance etapas más avanzadas que los estados iniciales de desarrollo.

CUADRO 17.3 Características ecológicas deseables de los agroecosistemas, en relación con el desarrollo sucesional

Característica	Etapa sucesional de mayor desarrollo			Beneficio al agroecosistema
	Temprana	Mediana	Tardía	
Diversidad de especies alta				Riesgo reducido de una pérdida catastrófica de cultivos
Biomasa total alta				Fuente sustancial de materia orgánica del suelo
Productividad primaria neta alta				Mayor potencial para la producción de biomasa cosechable.
Complejidad de la interacción de especies				Mayor potencial para el control biológico
Eficiente reciclaje de nutrientes				Menor necesidad de nutrimentos en forma de insumos externos
Interferencia mutualística				Mayor estabilidad; menor necesidad de insumos externos

paisajes agrícolas indica la posible aplicación de los conceptos de fragmentación y perturbaciones intermedias en el manejo de los agroecosistemas.

APLICACIONES AL MANEJO DE AGROECOSISTEMAS

La agricultura moderna ha desarrollado una serie de prácticas, tecnologías e insumos que permiten que los agricultores ignoren la mayoría de los procesos sucesionales. En lugar de la recuperación natural, los agricultores utilizan insumos y materiales que reemplazan lo que fue removido por la cosecha, o mediante el manejo. La perturbación constante mantiene al agroecosistema en las etapas iniciales de la sucesión, donde una mayor proporción de la productividad bruta está disponible como productividad neta o biomasa cosechable. Sin embargo, para desarrollar sistemas más estables, que sean mucho menos dependientes de las intervenciones humanas y de insumos contaminantes y no renovables, debemos hacer mucho más que aprovechar los procesos de recuperación natural de los ecosistemas. Nuestro conocimiento sobre el proceso sucesional en ecosistemas naturales, puede utilizarse para facilitar la recuperación de agroecosistemas que han sufrido impactos causados por perturbaciones originadas por los humanos. De igual manera, esta información sirve para planificar la introducción de perturbaciones en una forma controlada.

Expuesta de manera simple, la tarea consiste en diseñar agroecosistemas, que por un lado aprovechan algunos de los atributos benéficos de las etapas de la sucesión inicial y a la vez, incorporen las ventajas obtenidas al permitir que el sistema alcance las etapas sucesionales posteriores. Como se muestra en el Cuadro 17.3, en la etapa de sucesión inicial sólo se da una característica agroecológica deseable, una productividad primaria neta alta. Todas las características deseables restantes no se manifiestan hasta en las etapas posteriores de la sucesión.

El desafío para la investigación es desarrollar formas de integrar la perturbación y el desarrollo, de manera que se aprovechen las ventajas de los dos extremos. Para ello, se debe aprender a usar los procesos sucesionales, para instalar y desarrollar un agroecosistema, así como para reintroducir la perturbación y la recuperación en los momentos apropiados durante la vida del sistema.

Permitiendo el Desarrollo Sucesional

Por mucho tiempo, la agricultura ha tomado ventaja de la perturbación para mantener los sistemas agrícolas en etapas iniciales de la sucesión. Esto se da especialmente en los sistemas de cultivos anuales, donde no se permite que ninguna parte del ecosistema alcance etapas más avanzadas que los estados iniciales de desarrollo.

CUADRO 17.3 Características ecológicas deseables de los agroecosistemas, en relación con el desarrollo sucesional

Característica	Etapa sucesional de mayor desarrollo			Beneficio al agroecosistema
	Temprana	Mediana	Tardía	
Diversidad de especies alta			■	Riesgo reducido de una pérdida catastrófica de cultivos
Biomasa total alta			■	Fuente sustancial de materia orgánica del suelo
Productividad primaria neta alta	■			Mayor potencial para la producción de biomasa cosechable.
Complejidad de la interacción de especies			■	Mayor potencial para el control biológico
Eficiente reciclaje de nutrientes			■	Menor necesidad de nutrientes en forma de insumos externos
Interferencia mutualística			■	Mayor estabilidad; menor necesidad de insumos externos

En esta etapa, el sistema puede producir grandes cantidades de material cosechable, pero mantener un agroecosistema con este alto nivel de producción tiene su efecto sobre otros procesos de desarrollo, y la estabilidad se vuelve imposible.

Otro enfoque para el manejo de los agroecosistemas es el de "imitar a la naturaleza", que consiste en desarrollar sistemas agrícolas que usan como modelo los procesos sucesionales que ocurren naturalmente en ese lugar (Soule y Piper 1992, Hart 1980, Ewel 1986). Mediante este enfoque, algunas veces llamado el "modelo análogo", se pueden establecer agroecosistemas que son tanto estables como productivos.

Dentro de un esquema de sucesión manejada, las etapas sucesionales naturales son imitadas al introducir intencionalmente plantas, animales, prácticas e insumos que promueven el desarrollo de interacciones y conexiones entre los componentes del agroecosistema. Las especies vegetales (cultivos y otras plantas) que capturan y retienen nutrientes, son sembradas en el sistema para promover un buen desarrollo del suelo. Estas plantas incluyen leguminosas, con sus bacterias fijadoras de nitrógeno, y plantas con micorrizas que capturan el fósforo. Conforme se desarrolla el sistema, el incremento de la diversidad, la complejidad de la cadena alimenticia y el nivel de interacciones mutualísticas, conllevan a mecanismos más eficaces para el manejo de plagas y enfermedades. El énfasis del manejo, durante el proceso de desarrollo, está en el establecimiento de un agroecosistema complejo e integrado.

Este tipo de estrategia puede requerir un manejo más intensivo. Sin embargo, como los procesos son internalizados en el agroecosistema, debería también llevar a una menor dependencia de insumos externos de origen humano y a una mayor estabilidad.

Hay muchas maneras en las que un agricultor, empezando con una parcela de suelo limpio y recién cultivado, puede permitir un desarrollo sucesional que va más allá de las etapas iniciales. La Figura 17.3 describe un modelo general, comenzando con un monocultivo de un cultivo anual, y evolucionar hacia un sistema de cultivo de árboles perennes. Este se describe en mayor detalle en los párrafos siguientes.

1-2. El agricultor comienza sembrando un cultivo anual que crece muy rápido, captura nutrientes del suelo, produce una cosecha inicial y actúa co-

mo una especie pionera en el proceso de desarrollo. El agricultor también podría introducir cultivos anuales menos agresivos en la siembra inicial, imitando un proceso sucesional inicial.

3. En el siguiente paso (o en reemplazo del paso anterior), el agricultor puede sembrar un policultivo de especies anuales, que representen diferentes componentes de la etapa pionera. Las especies deben ser diferentes en cuanto a sus necesidades de nutrientes, atraerían diferentes tipos de insectos, tendrían raíces que alcanzan diferentes profundidades, y retornarían diferentes proporciones de biomasa al suelo. Una especie podría ser una leguminosa fijadora de nitrógeno. Todas estas especies contribuirían a iniciar el proceso de recuperación y modificarían el ambiente, de manera que otros organismos aparte del cultivo, puedan comenzar a colonizar el sistema (especialmente macro y microorganismos necesarios para el desarrollo del ecosistema suelo).
4. Siguiendo la etapa inicial de desarrollo (al final de la primera temporada o al principio de la segunda o tercera), pueden introducirse cultivos perennes de ciclo corto. Aprovechando la cobertura del suelo creada por los primeros cultivos, estas especies pueden diversificar el agroecosistema en aspectos ecológicos importantes. Sistemas de raíces más profundos, mayor cantidad de materia orgánica almacenada en la biomasa en pie, la expansión del hábitat y la diversidad microclimática, se combinan para avanzar en el desarrollo sucesional del agroecosistema.
5. Una vez que las condiciones del suelo mejoran lo suficiente, el terreno está listo para sembrar cultivos perennes de ciclo más largo, especialmente cultivos arbóreos intercalados con cultivos anuales. Durante su crecimiento inicial, los árboles tienen un impacto limitado sobre el ambiente que los rodea. Al mismo tiempo, se benefician por tener cultivos anuales rodeándolos. Esto porque en su crecimiento inicial son más susceptibles a la interferencia de especies de selección *r*, que de otra manera ocuparían el terreno y que son generalmente más agresivas que los cultivos.
6. Conforme se desarrollan los cultivos arbóreos, el espacio entre ellos puede seguir siendo manejado con cultivos anuales y perennes de ciclo corto.



FIGURA 17.1
La yuca (Manihot esculenta) una especie perenne de ciclo corto, intercalada con un cultivo anual de maíz, Turrialba, Costa Rica. La yuca se introduce después de que se ha establecido el maíz.

usando el enfoque agroforestal discutido a continuación.

7. Eventualmente, una vez que los árboles alcanzan su desarrollo completo, se llega al punto final del proceso de desarrollo. Esta etapa puede ser modelada con base en la estructura del ecosistema natural de la región. Una vez que esto se ha logrado, el agricultor tiene la opción de mantenerlo o de introducir una perturbación controlada,

para retornar el agroecosistema, o partes de éste, a etapas anteriores de la sucesión.

Es útil examinar cómo la productividad primaria neta y la biomasa en pie, cambian en el tiempo, cuando se permite que un agroecosistema pase por las etapas descritas en la Figura 17.3. Estos cambios son similares a aquellos que ocurren en los ecosistemas naturales conforme se desarrolla la sucesión después



FIGURA 17.2
Plántulas del árbol Gmelia arborea intercalado en un cultivo de maíz-calabaza en el sur de Campeche, México. La práctica de iniciar un cultivo arbóreo en un sistema de cultivo anual se llama taungya.

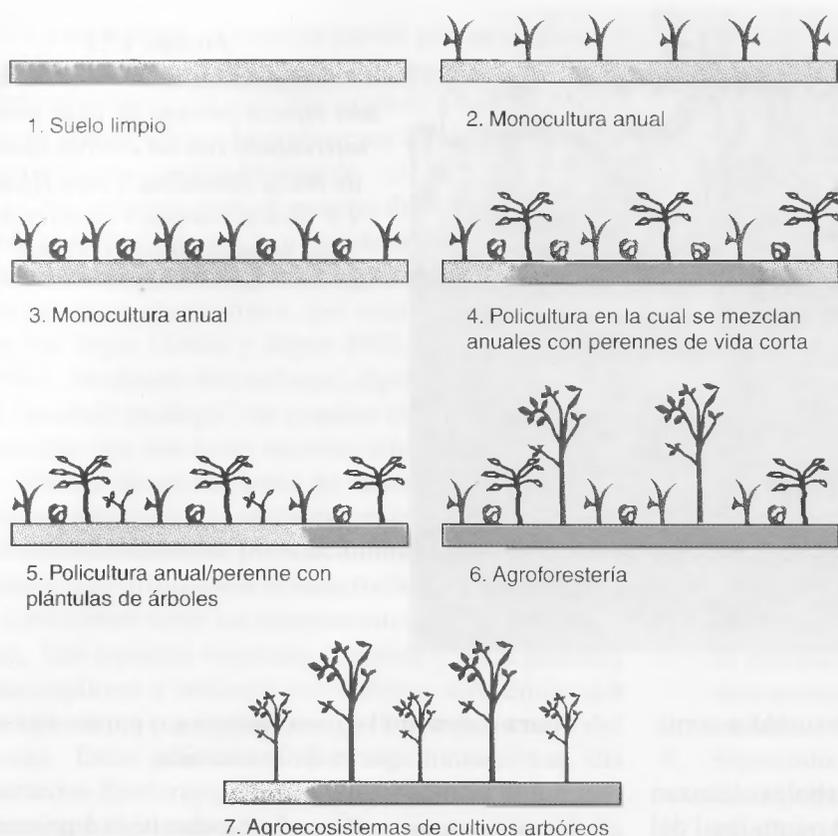


FIGURA 17.3

Etapas en el desarrollo sucesional de un agroecosistema. En cualquier etapa del proceso, las perturbaciones pueden ser introducidas para retornar el sistema completo, o parte de él, a una etapa de desarrollo anterior.

de un perturbación. Un modelo general de estos cambios a través del tiempo se presenta en la Figura 17.4. La productividad primaria neta (PPN) se incrementa rápidamente durante las primeras etapas del desarrollo del agroecosistema, y la mayoría de este incremento se encuentra disponible en forma de productos cosechables. Un intervalo de tiempo durante las etapas tempranas del desarrollo sucesional (ejemplo, etapas 2 y 3 en la Figura 17.3), mostrará el incremento más rápido en productividad primaria neta disponible durante el proceso de desarrollo, y proveerá la mayor cantidad de material cosechable en el menor tiempo. En etapas de desarrollo posteriores (ejemplo, etapa 7 en la Figura 17.3), cuando la tasa de PPN comienza a disminuir, la biomasa en pie (en forma de biomasa perenne acumulada) es relativamente alta, pero la cantidad actual de material cosechable nuevo, producido en cada intervalo de tiempo, comienza a bajar.

La relación cambiante entre PPN y biomasa, a través del tiempo, determina el manejo y las estrategias de producción que pueden ser usadas en cada etapa de desarrollo de un agroecosistema. Las limitaciones y el tipo de compromisos posibles cambian en cada período de la sucesión. En las primeras etapas de desarrollo, por ejemplo, la remoción constante de PPN restringe la acumulación de biomasa, mientras que si se restringe la remoción, esto fuerza al agricultor a esperar varios años para la cosecha. En las etapas intermedias de desarrollo, la PPN es lo suficientemente alta como para que una parte de ella (por ejemplo en la forma de fruta o nueces) sea cosechada, y otra parte continúe acumulándose como biomasa en pie. En las etapas tardías (ejemplo, etapa 7 en la Figura 17.3), la PPN disminuye a un nivel tan bajo, que una estrategia es permitir que toda la nueva PPN se acumule como biomasa, y así ir cosechando selectivamente partes de ésta como leña, madera, pulpa de

papel, o hasta comida.

Manejando Agroecosistemas con un Desarrollo Sucesional

Después de crear un agroecosistema mediante un desarrollo sucesional, el problema es determinar el mejor manejo. El agricultor tiene tres opciones básicas:

- Devolver el sistema completo a las etapas iniciales de la sucesión, introduciendo una perturbación mayor, tal como la tala completa de los árboles de un sistema de especies perennes. Muchas de las ventajas ecológicas logradas se perderán y el proceso comenzaría de nuevo.
- Mantener el sistema como un agroecosistema de cultivos perennes o de árboles.
- Reintroducir perturbaciones en el agroecosistema de manera controlada y localizada, aprove-

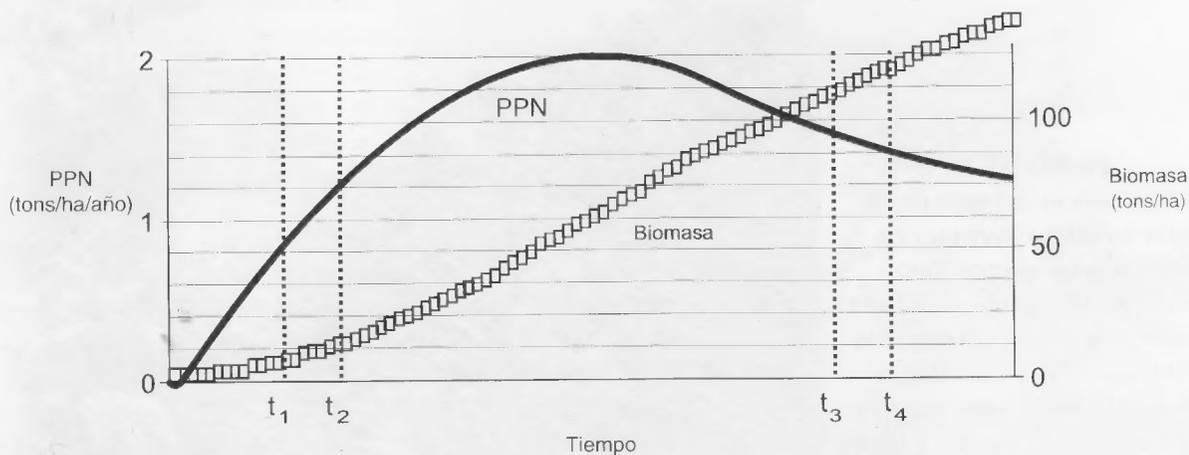


FIGURA 17.4

Cambios en el tiempo de la relación entre la productividad primaria neta (PPN) y la acumulación de biomasa viva y muerta, en una representación de un ecosistema con desarrollo sucesional. Un intervalo de tiempo (ejemplo, una temporada) en las etapas iniciales de la sucesión (tal como t_2-t_1) exhibirá un incremento rápido de la PPN, mientras que la PPN disminuirá un poco durante un intervalo de tiempo similar (tal como t_3-t_4), durante las etapas avanzadas de la sucesión. Adaptado de Whittaker (1975) y Odum (1993).

chando la hipótesis de perturbación intermedia y las dinámicas que este tipo de fragmentación introduce en el ecosistema. Pequeñas áreas del sistema pueden limpiarse, devolviendo estas áreas a las primeras etapas sucesionales, lo que permitiría la siembra de cultivos anuales o de ciclo corto. Si el proceso de perturbación se hace con cuidado, el ecosistema subterráneo puede ser mantenido en una etapa más avanzada de desarrollo, mientras que el sistema sobre la superficie puede estar compuesto por especies con alto potencial productivo, y que pueden ser removidas mediante la cosecha. Este tipo de mezcla de etapas de desarrollo iniciales y avanzadas da como resultado la formación de un **mosaico sucesional**. Este mosaico puede ser ajustado y manejado de acuerdo con las condiciones ecológicas de la zona y las necesidades del productor.

La última opción es la que proporciona más ventajas y ofrece la mayor flexibilidad al agricultor. Dentro de las limitaciones impuestas por los límites ecológicos de la región, la mezcla final de cultivos anuales y perennes, puede ser diseñada con base en las necesidades del agricultor y la comunidad agrícola. Asimismo, puede ajustarse a las demandas, distan-

cia y habilidad para penetrar a los mercados, y a la capacidad del productor para la compra y transporte de insumos. Entre más cercanos a la granja estén los insumos, la mano de obra y los mercados, puede dársele más énfasis al componente de cultivos anuales.

El mayor desafío del manejo de sistemas desarrollados mediante la sucesión es aprender cómo introducir perturbaciones de manera que estimulen, por un lado la productividad y por el otro lado, que generen resistencia al cambio y a la variación dentro del ecosistema. Esto puede hacerse de muchas formas diferentes, dependiendo de las condiciones ambientales locales, de la estructura de los ecosistemas maduros naturales presentes, y de la viabilidad del mantenimiento de modificaciones a estas condiciones en el largo plazo.

Por ejemplo, en las regiones de pastizales de los Estados Unidos, donde actualmente se produce un gran porcentaje de granos anuales, el enfoque podría ser el uso del modelo sucesional para diseñar sistemas de granos perennes, sin árboles (discutido en el Capítulo 13). Otro ejemplo es la región donde se cultiva arroz, en el valle del río Yangtze de China, donde el mantenimiento de estos sistemas, a largo plazo, se basa en el conocimiento de los ecosistemas de humedales, inundaciones periódicas y la alteración humana

FIGURA 17.5
Variaciones en las mezclas de plantas anuales y perennes en agroecosistemas desarrollados sucesionalmente. El maíz y el frijol cultivados para su comercialización en el mercado local, rodeados de árboles de Placaminero en la franja urbana alrededor de Beijing, China (derecha). A una distancia mucho mayor de cualquier mercado, una granja rural en el sur de Costa Rica (abajo), se concentra en el cultivo de arbustos y árboles perennes.



del suelo. Un agroecosistema de arroz desarrollado sucesionalmente, puede incorporar un componente perenne usando árboles que toleran condiciones húmedas, inundadas, como son los sauces, el ciprés pelón y otras especies riparias de humedales.

SISTEMAS AGROFORESTALES

Aunque los componentes perennes de un agroecosistema desarrollado sucesionalmente no tienen que ser árboles, los sistemas con árboles ofrecen algunos de los mejores ejemplos de cómo el desarrollo sucesional puede ser manejado. El término agroforestería ha sido usado para prácticas que, intencionalmente, retienen o siembran árboles en terrenos usados para la producción de cultivos o pastos (Wiersum 1981, Nair 1983). Estos sistemas combinan elementos de la agricultura de cultivos y animales con elementos forestales, ya sea al mismo tiempo o en secuencia, partiendo del valor productivo y protector característico de los árboles. Existen muchas variaciones en las prácticas que pueden considerarse agroforestales: en la agrosilvicultura, los árboles se combinan con cultivos; en los sistemas silvopastoriles, los árboles se combinan con la producción animal; en los sistemas agrosilvopastoriles, el agricultor maneja una mezcla

compleja de árboles, cultivos y animales. Todos los sistemas agroforestales son buenos ejemplos de cómo aprovechar la diversidad y el desarrollo sucesional para la producción de alimentos y otros productos agrícolas.

La incorporación de los árboles dentro de los agroecosistemas es una práctica que tiene una larga historia. Esta se presenta especialmente en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. En estas zonas, los agricultores han sembrado árboles junto con cultivos agrícolas y animales, para completar sus necesidades básicas de alimento, leña y forraje; así como para conservar y proteger sus recursos, los cuales son frecuentemente limitados.



FIGURA 17.6

Ganado que se ha concentrado bajo la sombra de un árbol solitario de Ceiba pentandra, en una pastura tropical de Tabasco, México. Los árboles pueden proveer una serie de beneficios a los sistemas de pastoreo y ramoneo.

El Papel Ecológico de los Árboles en la Agroforestería

Los árboles tienen la capacidad de alterar drásticamente las condiciones del ecosistema del cual forman parte (Reifsnyder y Darnhofer 1989, Farrell 1990). La productividad sostenible de los sistemas agroforestales se debe, en gran parte, a esta capacidad característica de los árboles.

Bajo el suelo, las raíces de los árboles penetran a niveles más profundos que las de los cultivos anuales, afectando la estructura del suelo, el reciclaje de nutri-

mentos y las relaciones de humedad de suelo. Sobre el suelo, el árbol altera el ambiente de luz mediante la sombra, lo cual afecta a su vez, la humedad y evapotranspiración. Las ramas y hojas proveen hábitats para una diversidad de vida animal y modifican los efectos locales del viento. Las hojas caídas proveen cobertura al suelo y modifican el ambiente edáfico. Conforme se descompone, esta hojarasca se convierte en fuente importante de materia orgánica. Estos y otros efectos ecológicos de los árboles se resumen en la Figura 17.7.

ESTUDIO DE CASO

Efecto de los Árboles sobre el Suelo, en Tlaxcala, México

Los árboles afectan el ambiente de un sistema agroforestal de diferentes formas. Los efectos específicos varían entre los diferentes sistemas, dependiendo de factores como elevación, precipitación anual, patrones de viento, geografía, tipo de suelo y, por supuesto, de la especie del ár-

bol. Para utilizar los árboles eficientemente en un agroecosistema, es importante considerar todos estos factores, así como las necesidades del agricultor. En las zonas bajas de Tlaxcala, México, los agricultores típicamente mantienen combinaciones de cinco especies de árboles, ya sea como árboles dispersos en el terreno, o como linderos. El investigador, John Farrell, decidió estudiar los dos árboles más comunes que se utilizan en las parcelas agrícolas de Tlaxcala, *Prunus capuli* y *Juniperus deppeana* (Farrell, 1990). Para cada especie, estu-

dió las condiciones ambientales directamente bajo la copa del árbol, en la zona de sombra del árbol, en la zona afectada por el sistema radicular y en la zona fuera de la influencia directa del árbol.

Farrell encontró que las condiciones del suelo fueron mejoradas de manera consistente por la presencia de los árboles. Los contenidos de carbono, nitrógeno y fósforo fueron significativamente más altos en la zona de influencia de los árboles. Otros efectos benéficos incluyeron un pH del suelo más alto, un incremento en el nivel de humedad y una temperatura del suelo más baja. Todos estos efectos disminuyeron conforme aumentaba la distancia al árbol.

Los efectos negativos fueron la reducción de rendimiento en la zona directamente bajo la copa del árbol. El maíz sembrado en esta zona fue más

pequeño y produjo aproximadamente la mitad del grano que el plantado fuera de la zona. Sin embargo, el maíz en zonas parcialmente sombreadas, y dentro del área de influencia del sistema radicular, produjo los mismos rendimientos que el maíz fuera de la zona de influencia del árbol. Farrell concluyó que la reducción en rendimientos del maíz sombreado, fue resultado únicamente del efecto de la sombra y no debido a la competencia por nutrimentos.

El sombreado de cultivos, debajo de la copa de un árbol, demuestra que el uso de árboles en los agroecosistemas siempre incluye compromisos. Sin embargo, con el manejo adecuado, los agricultores pueden maximizar los beneficios de los árboles y a la vez, minimizar los efectos negativos sobre los rendimientos.

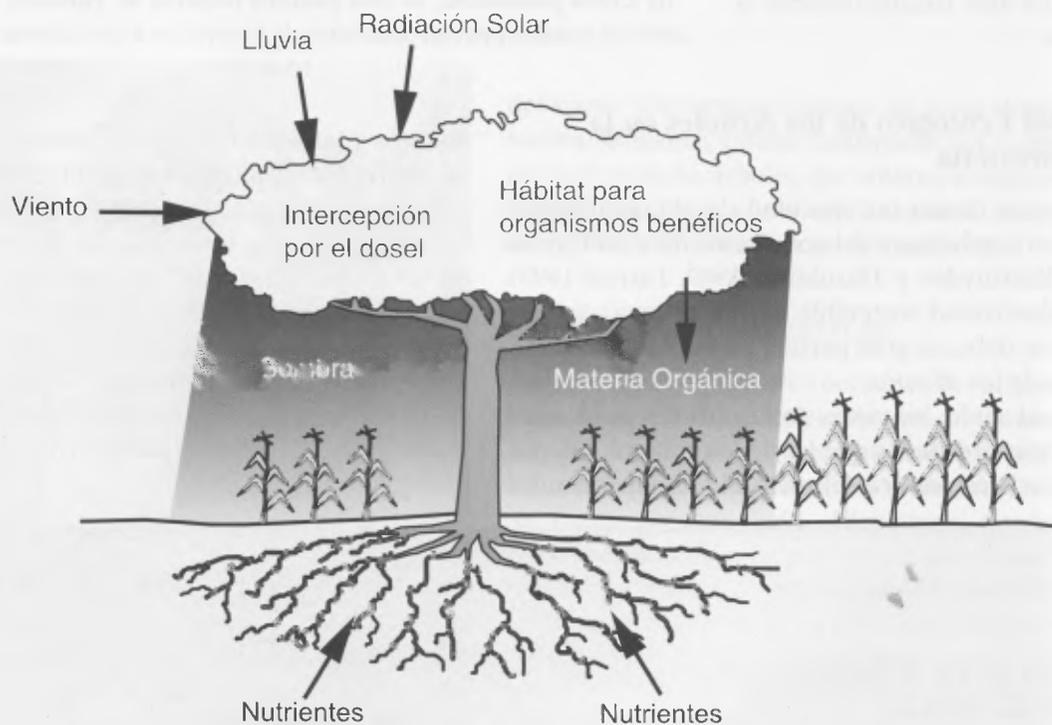


FIGURA 17.7

Efectos de los árboles sobre el agroecosistema que los rodea. Debido a su tamaño, profundidad de raíces y naturaleza perenne, un árbol tiene efectos significativos sobre las condiciones abióticas de un agroecosistema. A la vez, los árboles forman parte de muchas interacciones bióticas del sistema. Adicionalmente, un árbol puede reducir la erosión eólica y por escorrentía, proveer sombra y forraje para los animales, formar asociaciones con micorrizas, moderar la temperatura y reducir la evapotranspiración. Los árboles leguminosos pueden aportar nitrógeno al sistema, debido a su asociación con bacterias fijadoras de nitrógeno. Adaptado de Nair (1984) y Farrell (1990).

Debido a estos efectos, los árboles en los agroecosistemas representan una buena base para desarrollar las características emergentes de ecosistemas más complejos. Los árboles permiten una captura más eficiente de la energía solar, favorecen la absorción, retención y reciclaje de nutrientes, y mantienen el sistema en un estado de equilibrio dinámico. Al proveer micrositios y recursos permanentes, posibilitan una población más estable entre las plagas y sus depredadores. En un sistema agroforestal, todos estos factores pueden manejarse para beneficiar a los cultivos y los animales de la asociación, así como para reducir la dependencia del sistema sobre insumos externos.

Manejo y Diseño de Sistemas Agroforestales

En un sistema agroforestal, los agricultores tienen la opción de decidir cuántos árboles incluir, la frecuencia y la forma de removerlos, y el tipo de patrón de mosaico sucesional que desean mantener. Estas decisiones de manejo dependen del ambiente y de la cultura locales, así como de la naturaleza y la proximidad de los mercados.

Optimizando los Efectos Positivos de los Árboles

El conocimiento de los impactos positivos y negativos de los árboles sobre el resto del agroecosistema, es esencial para entender completa y efectivamente la integración de éstos al sistema. Los impactos positivos discutidos anteriormente necesitan ser balanceados con los efectos negativos de los árboles. Estos incluyen la interferencia competitiva o alelopática entre los árboles y cultivos, modificación del microclima que favorezca el desarrollo de plagas y enfermedades, y los daños a cultivos como resultado de ramas y frutas que caen de los árboles maduros. Estos efectos negativos pueden ser evadidos o mitigados mediante un arreglo espacial adecuado de los árboles; por la selección de las especies de árboles y cultivos anuales; por la época de siembra y por las podas. La integración de árboles requiere de un conocimiento amplio de gran cantidad de interacciones ecológicas presentes.

Manejando la Interdependencia

Conforme completamos nuestro conocimiento de los procesos ecológicos que ocurren en los sistemas agroforestales complejos, podemos empezar a visualizar cómo los componentes de estos sistemas se vuelven interdependientes. Un componente anual podría hacerse dependiente de las ventajas que proporcionan los árboles; por ejemplo, la modificación del hábitat, la captura de nutrientes a niveles más profundos y la presencia constante de insectos benéficos. La siembra de componentes anuales en el sistema puede prevenir el establecimiento de especies invasoras, que pueden interferir con el crecimiento de los árboles. Los animales se benefician del alto nivel de PPN producidos por los componentes anuales o de ciclo corto, y retornan nutrientes al suelo en forma de orina y estiércol. El manejo de los sistemas agroforestales debe estar orientado a maximizar los beneficios de esta serie de complejas interdependencias ecológicas.

Debemos recordar también que las interdependencias ecológicas son sólo una parte del sistema. Los humanos también dependen de los árboles para abastecerse de leña, madera, forraje para animales, frutas, nueces, especias y medicinas. Los sistemas agroforestales pueden diseñarse considerando estas necesidades. De esta manera, los árboles pueden desempeñar una función importante desde perspectivas ecológicas y económicas. Cuando esto ocurre, se puede desarrollar una interdependencia entre la comunidad agrícola y las granjas que la componen.

Arreglos Espaciales de los Árboles

Los árboles pueden tener una variedad de arreglos diferentes en los sistemas agroforestales. Los patrones utilizados dependen de las necesidades del agricultor, la naturaleza del agroecosistema, y de las condiciones ambientales y económicas locales. Como ejemplos, la Figura 17.8 presenta seis formas diferentes de cómo se pueden arreglar los árboles en la misma área de un terreno.

Si el interés principal de un agricultor son las actividades silvopastoriles, una siembra en linderos, alrededor de una pastura (a) podría ser la mejor opción. En este caso, los árboles se desarrollan como cercas

vivas y cortinas rompevientos, que producen forraje ocasional y productos cosechables como leña o frutas. En el caso de que el viento sea el problema más serio, y el enfoque sea sobre la producción agrícola, un sistema de cortinas rompevientos (b) podría ser la mejor opción. Cuando las ramas y hojas podadas del componente arbóreo son utilizadas para mejorar la producción agrícola (como fuentes de nutrimentos y materia orgánica), pueden utilizarse hileras de árboles como "callejones" de cultivos (c). Cuando los árboles tienen un valor agrícola, pueden encontrarse dispersos dentro del componente agrícola o de la pastura, ya sea en patrones uniformes (d), o al azar (e).

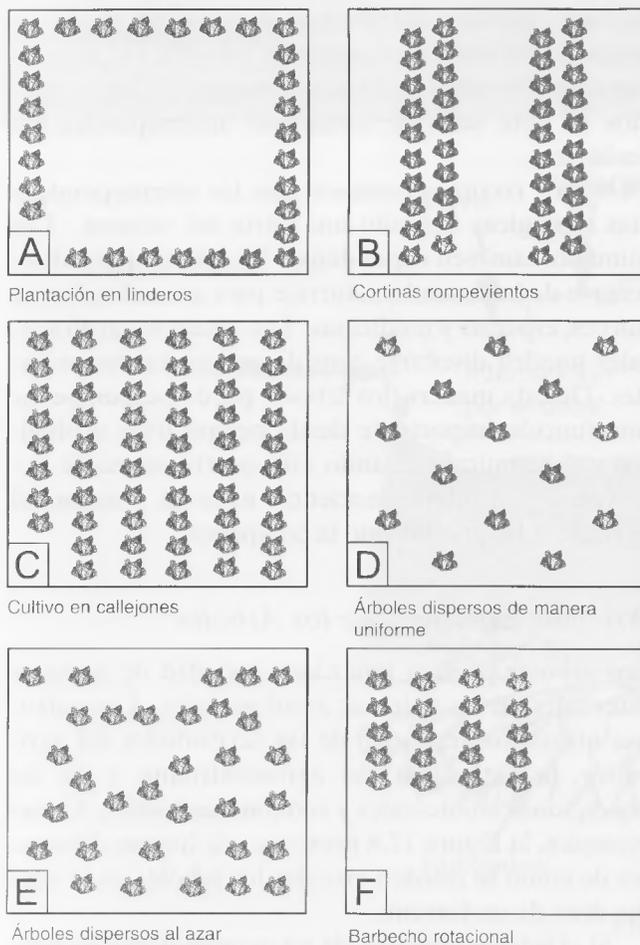


FIGURA 17.8
Modelos para el arreglo de árboles en sistemas agroforestales.

Adaptado de Young (1989).

Finalmente, si las condiciones del suelo son extremadamente pobres y no permiten el pastoreo o cultivos permanentes, puede utilizarse un diseño rotacional (f). En este último caso, los períodos de desarrollo de los árboles pueden determinarse por una serie de factores similares a los que se utilizan para definir el período de barbecho en la agricultura de tumba y quema. Un entendimiento afinado de la interacción, integración e interdependencia de todos los componentes del sistema, servirá para la determinación del arreglo espacial de los árboles, así como en la predicción de los cambios del sistema a través del tiempo.

Huertos Caseros Tropicales

Los huertos caseros tropicales agroforestales (también denominados huertos familiares, solares, traspatio y jardín de casa) son un sistema con gran complejidad y diversidad, así como oportunidades para mantener un mosaico de las etapas de la sucesión. Probablemente, es uno de los tipos de agroecosistemas más complejos e interesantes, que a la vez puede enseñarnos mucho sobre cómo manejar los recursos para lograr una agricultura sostenible (Allison 1983, Niñez 1985, Budowski 1985). El huerto casero es un ecosistema que incluye humanos, plantas, animales, suelo y agua, integrados con árboles que cumplen papeles ecológicos claves. Generalmente, ocupa áreas bien definidas, entre 0,5 y 2,0 hectáreas, en zonas muy próximas al complejo residencial. Con gran riqueza de especies de plantas, los huertos caseros son generalmente dominados por leñosas perennes. Una mezcla de plantas anuales y perennes de diferentes alturas, forman estratos de vegetación similares a la estructura de los bosques naturales. La gran diversidad de especies permite cosechar, durante el año, alimentos y otros productos como leña, plantas medicinales, especies y plantas ornamentales (González 1985, Christanty *et al.* 1986).

Diversidad Elevada

La diversidad ecológica de los huertos caseros -incluyendo diversidad de especies, estructura, función y arreglos horizontales y verticales- es extraordinariamente grande. Dos ejemplos nos sirven para ilustrar este hecho.

vivas y cortinas rompevientos, que producen forraje ocasional y productos cosechables como leña o frutas. En el caso de que el viento sea el problema más serio, y el enfoque sea sobre la producción agrícola, un sistema de cortinas rompevientos (b) podría ser la mejor opción. Cuando las ramas y hojas podadas del componente arbóreo son utilizadas para mejorar la producción agrícola (como fuentes de nutrientes y materia orgánica), pueden utilizarse hileras de árboles como "callejones" de cultivos (c). Cuando los árboles tienen un valor agrícola, pueden encontrarse dispersos dentro del componente agrícola o de la pastura, ya sea en patrones uniformes (d), o al azar (e).

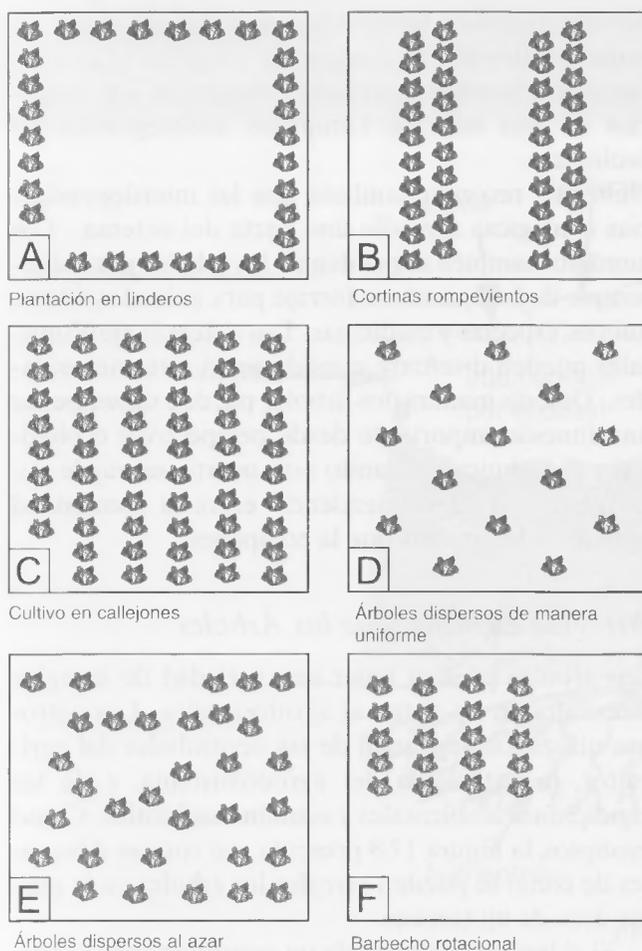


FIGURA 17.8
Modelos para el arreglo de árboles en sistemas agroforestales.

Adaptado de Young (1989).

Finalmente, si las condiciones del suelo son extremadamente pobres y no permiten el pastoreo o cultivos permanentes, puede utilizarse un diseño rotacional (f). En este último caso, los períodos de desarrollo de los árboles pueden determinarse por una serie de factores similares a los que se utilizan para definir el período de barbecho en la agricultura de tumba y quema. Un entendimiento afinado de la interacción, integración e interdependencia de todos los componentes del sistema, servirá para la determinación del arreglo espacial de los árboles, así como en la predicción de los cambios del sistema a través del tiempo.

Huertos Caseros Tropicales

Los huertos caseros tropicales agroforestales (también denominados huertos familiares, solares, traspatio y jardín de casa) son un sistema con gran complejidad y diversidad, así como oportunidades para mantener un mosaico de las etapas de la sucesión. Probablemente, es uno de los tipos de agroecosistemas más complejos e interesantes, que a la vez puede enseñarnos mucho sobre cómo manejar los recursos para lograr una agricultura sostenible (Allison 1983, Niñez 1985, Budowski 1985). El huerto casero es un ecosistema que incluye humanos, plantas, animales, suelo y agua, integrados con árboles que cumplen papeles ecológicos claves. Generalmente, ocupa áreas bien definidas, entre 0,5 y 2,0 hectáreas, en zonas muy próximas al complejo residencial. Con gran riqueza de especies de plantas, los huertos caseros son generalmente dominados por leñosas perennes. Una mezcla de plantas anuales y perennes de diferentes alturas, forman estratos de vegetación similares a la estructura de los bosques naturales. La gran diversidad de especies permite cosechar, durante el año, alimentos y otros productos como leña, plantas medicinales, especias y plantas ornamentales (González 1985, Christanty et al. 1986).

Diversidad Elevada

La diversidad ecológica de los huertos caseros -incluyendo diversidad de especies, estructura, función y arreglos horizontales y verticales- es extraordinariamente grande. Dos ejemplos nos sirven para ilustrar este hecho.



altura mayor a 14 m. El índice de área foliar de este huerto fue de 3.9 y su biomasa foliar de 309 g/m²; fue la segunda más alta de todos los ecosistemas examinados.

La biomasa total del sistema radicular por m² hasta 25 cm de profundidad fue idéntica a la biomasa

El factor de mayor impor-

en el orden de que

en el orden de que



FIGURA 17.9

Un huerto casero tropical tradicional en Cupilco, Tabasco, México. Una mezcla diversa de hierbas, arbustos y árboles útiles, se han asociado en un área cercana a la residencia.

En un estudio de huertos caseros en sitios elevados y bajos de México, se encontró que en áreas bastante pequeñas (entre 0,3 y 0,7 ha) existía una gran diversidad de especies. Este hecho permitió el mantenimiento de huertos, que en muchos aspectos eran similares a los ecosistemas naturales locales (Allison 1983). Los huertos estudiados tuvieron índices de diversidad relativamente altos para sistemas agrícolas (Cuadro 17.4). Además, los índices de área foliar y niveles de cobertura se aproximaron a los ecosistemas naturales de las regiones aledañas, los cuales son sumamente complejos.

En otro estudio, se analizaron las características ecológicas de nueve ecosistemas tropicales diferentes (Ewel *et al.* 1982). En este trabajo, un huerto casero de 40 años mostró el dosel con la distribución más equitativa, el cual estuvo distribuido uniformemente desde el nivel del suelo hasta una

altura mayor a 14 m. El índice de área foliar de este huerto fue de 3,9 y su biomasa foliar de 309 g/m²; fue la segunda más alta de todos los ecosistemas examinados. La biomasa total del sistema radicular por m², hasta 25 cm de profundidad, fue idéntica a la biomasa foliar. El factor de mayor importancia, fue tal vez el hecho de que de los nueve sistemas estudiados, el suelo del huerto casero tuvo el área de superficie radicular de diámetro pequeño (<5 cm) más elevado por superficie de área de suelo. Estas características son indicativas de un sistema ecológico eficiente, especialmente en cuanto a su habilidad de captura de luz, mantenimiento de nutrimentos en los niveles superficiales del suelo, almacenamiento de nutrimentos en la biomasa sobre el suelo, y en la reducción del impacto de la lluvia y el sol sobre el suelo.

Los árboles en un huerto casero -y la forma en que son manejados por los humanos- hacen posible mucha de la diversidad, complejidad y funcionamiento eficiente de un huerto. El dióxido de carbono atrapado entre los estratos del dosel puede estimular la

CUADRO 17.4 Características de sistemas de huertos caseros en dos sitios de México

Características	Sitio bajo (Cupilco, N=3)	Sitio alto (Tepeyanco, N=4)
Tamaño del huerto	0,70 ha	0,34 ha
Especies útiles por huerto	55	33
Diversidad (Índice de Shannon)	3,84	2,43
Índice de área foliar	4,5	3,2
% de cobertura	96,7	85,3
% de transmisión de luz	21,5	30,5
Especies perennes (%)	52,3	24,5
Especies de árboles (%)	30,7	12,3
Plantas ornamentales (%)	7,0	9,0
Plantas medicinales (%)	2,0	2,8

Fuente: Allison (1983).

actividad fotosintética, y los diferentes estratos incrementan la diversidad de los hábitats para insectos y pájaros que sirven para mantener el control biológico del sistema. Las raíces de los árboles evitan que los nutrientes sean lixiviados y la hojarasca de los árboles devuelve estos nutrientes al resto del sistema.

Usos y Funciones Múltiples

Una característica importante de los huertos caseros es su utilidad multifacética. Los árboles pueden producir alimentos, tales como los cocos, que pueden servir ya sea para la subsistencia como para la venta. Las partes leñosas de los árboles pueden usarse para madera o para leña. La diversidad de alimentos que provienen de plantas y animales, proveen una dieta variada y balanceada en cuanto al contenido de carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales (Dewey 1979). Debido a la mezcla de especies y la variabilidad de éstas en sus períodos de floración y maduración de la fruta, siempre hay algo listo para ser cosechado. Esto asegura fuentes de alimentos o ingresos durante todo el año (Gliessman 1990a).

El huerto casero puede tener también funciones sociales o estéticas, como servir de indicador del estatus social de su dueño, o mejorar el ambiente directamente asociado a la residencia. Al mismo tiempo, los huertos pueden tener una importante función como fuente de ingresos para las familias rurales. En estudios realizados en la isla de Java, se encontró que entre el 20% y 30% del ingreso anual de muchos hogares se obtenía del huerto casero (Hisyam *et al.* 1979). La

producción en los huertos locales disminuyó considerablemente durante la cosecha del arroz, cuando la mano de obra estaba concentrada en ese cultivo, que tiene gran importancia para el consumo y la comercialización. Sin embargo, durante el resto del año la actividad en los huertos era bastante alta.

Cambio Dinámico

Los pocos estudios de largo plazo que se han desarrollado demuestran que los huertos caseros son dinámicos y cambiantes. En un estudio en Costa Rica, se evaluó un huerto casero cerca de Puerto Viejo, que estaba en un proceso de cambio debido a la necesidad de ingresos en efectivo y a la escasez de tierra y mano de obra (Flietner 1985). El estrato de árboles en aproximadamente la mitad del huerto (de un área total de 3264 m²), estaba siendo reemplazado con cocos sembrados en hileras equidistantes. El estrato inferior se había sembrado con monocultivos de yuca (*Manihot esculenta*) y piña (*Ananas comosus*). Con la construcción de una carretera utilizable todo el año, los camiones para transportar productos hicieron mucho más accesibles los mercados. Se creó una demanda por cocos y piñas que no existía pocos años atrás. Los agricultores estaban ajustando su agroecosistema para enfrentar esta demanda. Adicionalmente, el dueño del huerto estudiado había tomado un



FIGURA 17.10
El huerto casero cerca de Puerto Viejo, Costa Rica, experimentando una transición hacia cultivos para comercializar. Una nueva carretera abrió oportunidades de acceso al mercado y motivó cambios en la mezcla de especies del huerto.

empleo externo recientemente, lo que no le permitía realizar las tareas requeridas para el manejo de un huerto con una diversidad más grande.

Conforme los cocos crezcan y generen un ambiente con más sombra sobre el suelo, el agricultor tendrá que decidir qué cambios habrá que hacer con los cultivos del dosel inferior. Podría cambiarlos por malanga (*Colocasia esculenta*), la cual ya es común en los lugares sombreados del huerto. También podría decidir talar parte de los árboles para reintegrar más cultivos anuales y perennes de ciclo corto, que fueron comunes en el desarrollo inicial del sistema.

En un huerto casero estudiado en Cañas, Guanacaste, Costa Rica, se observaron cambios interesantes en la diversidad y la organización del huerto de un año a otro (Gliessman 1990a). Estos datos se presentan en el Cuadro 17.5. El número total de especies en el huerto se incrementó por 12, pero lo que causó más asombro fue el gran incremento en el número total de plantas individuales. Una gran parte de este incremento se dio en las especies ornamentales, el componente predominante en el segundo año, el cual fue acompañado por más especies medicinales y especias. Algunas de las especies alimenticias que fueron comunes el año anterior, tal como la calabaza, no estuvieron presentes en 1986 debido a una sequía que eliminó las plántulas.

Algunos de los cambios en el huerto estaban relacionados con cambios en la situación económica del hogar. En 1986, la mujer encargada del hogar tuvo menos tiempo para encargarse del huerto, ya que ella

y sus hijas abrieron una pequeña panadería para la venta local. Si la panadería fracasa, los cultivos alimenticios probablemente volverán a recibir mayor atención.

Aunque los factores socioeconómicos explican una parte del cambio en el huerto, algunos también ocurren por razones ecológicas. El cambio en los huertos caseros es constante y a veces muy rápido, debido a las dinámicas cambiantes del proceso de perturbación-recuperación.

Vínculos con el Sistema Social

Como indican los estudios descritos anteriormente, los factores sociales y económicos pueden tener impactos significativos sobre los huertos caseros y su manejo. Un estudio a largo plazo, sobre agricultura tradicional en Tlaxcala, México, encontró que los cambios que se habían dado en la diversidad, estructura y manejo de los huertos caseros, fueron resultado de la industrialización y el incremento de la población. En general, los agricultores redujeron el número de especies en sus huertos caseros; utilizaron patrones de cultivo más ordenados y fáciles de manejar; y sembraron especies que podían fácilmente insertarse en la economía de mercado. Sin embargo, como Tlaxcala ha experimentado varios ciclos de "alta y baja", donde el empleo fuera de la granja ha sido alternativamente disponible y escaso, los agricultores no confían del todo en los empleos externos. Como resultado, aún en los tiempos de disponibilidad de ingresos fuera de la granja, los agricultores han mantenido agroecosistemas diversos como un seguro contra la posible pérdida de éstos.

El crecimiento de la población regional ha tenido un impacto variado sobre la estructura de los huertos caseros. Como Tlaxcala se encuentra cerca de Puebla y la ciudad de México, los cuales son grandes centros industriales-urbanos en expansión, existe gran demanda y mercados para gran variedad de productos agrícolas; desde maíz, hasta las flores ornamentales. Esta demanda estimula la diversificación de los sistemas locales de cultivo, pero también presiona a los agricultores a sembrar cultivos para la venta, y a abandonar especies para la subsistencia. Las familias que perciben una ventaja en tener cultivos para la subsistencia y también para la venta, son las que mantienen los huertos más diversos,

CUADRO 17.5 Comparación de las especies de plantas en un huerto casero de 1240 m², durante dos años, en Cañas, Guanacaste, Costa Rica

	1985	1986
Especies	71	83
Individuos	940	1870
Especies arbóreas	17	16
Especies alimenticias	21	18
Especies ornamentales	23	31
Especies medicinales	7	9
Especies para leña	3	5
Especies	0	4

Fuente: Gliessman (1990a).

mientras que los otros cultivan principalmente para el mercado.

Aunque el cambio económico regional tiene un impacto claro sobre los huertos caseros, la relación entre ambos también puede ser revertida. Cuando existen los huertos caseros, proveen a las familias medios para la supervivencia, lo que tiende a estabilizar la economía y la estructura social local. Actúan como un puente entre la economía local tradicional y la economía moderna e industrial, ayudando a amortiguar las fuerzas que fomentan la migración a las ciudades y el abandono de vínculos sociales tradicionales. Al ofrecer la posibilidad de autonomía local, equidad económica y sostenibilidad ecológica, los huertos brindan ejemplos importantes que pueden ser adaptados y aplicados en todo el mundo.

PERTURBACIONES, RECUPERACIÓN Y SOSTENIBILIDAD

Los huertos caseros y los sistemas agroforestales fueron analizados en este Capítulo por su utilidad como modelos de agricultura sostenible. Estos incorporan un ámbito de características deseables que son aplicables y adaptables a cualquier agroecosistema. Manejables y productivos, tienen la capacidad de responder a diferentes factores o condiciones en el ambiente, llenar las necesidades por diversos productos y materiales que tienen las poblaciones humanas, y responder a demandas socioeconómicas externas. Así mismo, no son dependientes de insumos agrícolas importados y costosos, y tienen impactos mínimos sobre el ambiente.

Es urgente generar más información sobre los tipos existentes de sistemas desarrollados sucesionalmente, especialmente aquellos con arbustos perennes y árboles. La urbanización y el rápido movimiento hacia la simplificación de los agroecosistemas y a los cultivos comerciales, está amenazando la existencia de estos sistemas; especialmente en países en desarrollo. Necesitamos ubicar, describir y monitorear sistemas que incorporen conocimientos tradicionales sobre manejo de sucesión y perturbación, con mejoramientos seleccionados con bases agroecológicas. Además, los estudios de este tipo de sistemas (ejemplo, Chavelas 1979, Gliessman *et al.* 1981), necesitan que se les brinde mayor apoyo institucional.

Tal vez el valor más importante de los sistemas agroforestales, es que ofrecen principios que pueden

ser aplicados a agroecosistemas con o sin árboles. Al observar los agroecosistemas como sistemas sucesionales, en los que se incorporan especies perennes, se introduce apropiadamente la perturbación y se promueve la recuperación de la perturbación, podemos avanzar hacia la producción sostenible de alimentos. Los límites sólo se fijan por el tipo de ecosistemas maduros que naturalmente se dan en una región, y por el componente humano de manejo y diseño de alternativas sostenibles que parten del modelo de estos ecosistemas. Independientemente si son sistemas de granos o huertos caseros, deben ser dinámicos, diversos y flexibles, incorporando las características de resiliencia y resistencia a la perturbación, las cuales son importantes en los ecosistemas. Adicionalmente, estos agroecosistemas deben tener la habilidad de renovarse y regenerarse constantemente, mediante el proceso de recuperación de la sucesión.

La implementación extensiva de prácticas basadas en los procesos de perturbación y recuperación, necesitará de considerable apoyo de la investigación. Sin embargo, puede llevarnos a desarrollar un paisaje agrícola que resulte en un mosaico de agroecosistemas. La necesidad de altos rendimientos cosechables puede ser llenada por cultivos anuales y perennes de ciclo corto, intercalados con policultivos de varias especies que sean interdependientes y ecológicamente complementarios. La estructura y organización del terreno puede cambiar con el tiempo, mientras la sucesión se desarrolla hacia los componentes perennes de ciclo largo. Incorporado al ciclo de perturbación, podría darse un mosaico de rotaciones. Algunas áreas se dejarían desarrollar hasta la madurez y su vegetación perenne o arbórea, sería cosechada o reciclada para abrir partes del agroecosistema que se destinarían nuevamente a cultivos anuales. Al final, se lograría el desarrollo de un mosaico sostenible.

Ideas para Meditar

1. ¿Qué tan similares o diferentes son los impactos ecológicos causados por perturbaciones ocasionadas por los humanos en agroecosistemas, comparados con las perturbaciones que ocurren en los ecosistemas naturales?
2. Describa cómo el "modelo análogo" de diseño y manejo de agroecosistemas puede ser aplicado a su región agrícola. Asegúrese de indicar clara-

mente las etapas sucesionales que su sistema necesitaría experimentar y ¿cómo éstas reflejan lo que sucede en los ecosistemas naturales que existen (o existieron) alrededor de su granja?.

3. Brinde ejemplos de cómo el diseño de sistemas agroforestales puede estar influenciado por el conocimiento sobre el impacto ecológico de los árboles en el ambiente, y cómo puede diseñarse considerando la necesidad del agricultor de cosechar productos específicos.
4. ¿Cómo integraría el potencial de cosecha con el balance ecológico en el diseño de un huerto casero agroforestal, específicamente adaptado al lugar en que vive? Asegúrese de describir los antecedentes ecológicos y culturales que afectan sus determinaciones de diseño.
5. ¿Por qué han desaparecido tantos árboles del paisaje agrícola en los últimos decenios y especialmente en países en desarrollo?
6. Desde una perspectiva agroecológica ¿cuáles son algunas de las relaciones más importantes entre la diversidad y la perturbación en la agricultura sostenible?
7. Describa cómo un paisaje agrícola conformado por un mosaico de fragmentos sucesionales puede ser descrito como un "policultivo de monocultivos".

Lecturas Recomendadas

Biotropica. 1980. Volumen 12. Edición Especial sobre la Sucesión Tropical.

Una colección de artículos de investigación que cubren un ámbito de temas relacionados con la sucesión en ecosistemas y agroecosistemas tropicales.

Mooney, H.A. & M. Godron (eds.). 1983. *Disturbance and Ecosystems*. Springer-Verlag: Berlin.

Una revisión de la relación entre la perturbación y la estructura y función del ecosistema.

Nair, P.K.R. 1984. *Soil Productivity Aspects of Agroforestry: Science and Practice in Agroforestry*. International Council for Research in Agroforestry (ICRAF): Nairobi, Kenya.

Una introducción de fácil lectura sobre la importan-

cia y el valor de la incorporación de los árboles a los sistemas agrícolas.

Odum, E.P. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* 164: 262-270.

Un documento clave para entender la relación entre la sucesión y el desarrollo del ecosistema.

Organización para los Estudios Tropicales (OET). 1986. *Sistemas Agroforestales: Principios y Aplicaciones en los Trópicos*. Organización para los Estudios Tropicales (OET) y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE): San José, Costa Rica.

Una revisión práctica excelente sobre los conceptos de la agroforestería con estudios de caso sobre su aplicación en los trópicos.

Pickett, S.T.A. & P. White (eds.). 1985. *The Ecology of Natural Disturbances and Patch Dynamics*. Academic Press: Orlando, FL.

Un compendio de estudios sobre cómo la perturbación y la fragmentación que esta induce en los ecosistemas, son parte integral del desarrollo y la estabilidad de los ecosistemas naturales.

Soule, J.D. & J.K. Piper. 1992. *Farming in Nature's Image*. Island Press: Washington, D.C.

Una revisión de lo que significa usar la naturaleza y nuestra comprensión de los procesos ecológicos como modelo para diseñar y manejar agroecosistemas, con un énfasis sobre la región medio oeste de los Estados Unidos.

Watt, A.S. 1947. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology* 35: 1-22.

Un documento clásico sobre el funcionamiento de la sucesión en las comunidades vegetales.

West, D.C., H.H. Shugart, & D.B. Botkin. 1981. *Forest Succession: Concepts and Applications*. Springer-Verlag: New York.

Una revisión muy completa de la sucesión secundaria, ilustrada con estudios de una diversidad de los ecosistemas forestales del mundo.

LA ENERGÍA EN LOS AGROECOSISTEMAS

La energía es la fuente de vida de los ecosistemas y de la biosfera en general. Fundamentalmente lo que los ecosistemas hacen es capturar y transformar energía.

La energía está fluyendo constantemente a través de los ecosistemas en forma unidireccional. Ingresa como energía solar y los organismos fotosintetizadores (plantas y algas) la convierten en energía potencial. La energía se almacena en forma de biomasa y compuestos químicos. Cada vez que esta energía potencial es consumida por los organismos para llevar a cabo sus funciones de crecimiento, movimiento, reproducción, etc., se transforma en calor que no es disponible para otro uso. Así, en forma de calor, la energía abandona el ecosistema.

En esencia la agricultura es la manipulación que hacen los seres humanos de la energía en los ecosistemas. Los humanos usamos a los agroecosistemas para capturar y convertir energía solar en alguna forma particular de biomasa que puede ser usada como comida, como fibra, o como combustible.

Todos los agroecosistemas desde el más sencillo, como plantaciones localizadas en los inicios de la agricultura, hasta los más intensos y alterados de hoy en día, requieren de una adición extra de energía diferente a la que provee el sol. Esta energía adicional es necesaria, en parte, debido a la gran remoción de biomasa, energía potencial, de los agroecosistemas en forma de material cosechado. Los seres humanos intervenimos en los agroecosistemas en varias formas, por ejemplo manejando plantas que no son los cultivos, manejando a los herbívoros, irrigando, arando el suelo, etc. Para hacer esto se necesita trabajo y energía.

La modernización de la agricultura en los últimos decenios se ha basado en el proceso de adicionar grandes cantidades de energía a los agroecosistemas, con el propósito de incrementar las cosechas. La mayoría de esta energía adicional proviene directa o indi-

rectamente de fuentes no renovables como el petróleo. Además, la cantidad de energía cosechada es menor que la cantidad de energía adicionada a varios cultivos; por lo tanto, las formas intensas de uso de energía en nuestros agroecosistemas actuales, no pueden ser sostenidas a largo plazo, a menos que existan cambios fundamentales en la forma de hacer agricultura.

ENERGÍA Y LAS LEYES DE LA TERMODINÁMICA

Cualquier análisis del flujo de energía en los agroecosistemas demanda un entendimiento básico de las leyes físicas que gobiernan la energía. Primero, debemos responder a la pregunta ¿qué es energía?. La forma más común de definir energía es la habilidad para hacer un trabajo. El trabajo ocurre cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo durante alguna distancia. Cuando la energía está haciendo trabajo, se le llama energía cinética. Existe energía cinética cuando, por ejemplo, se mueve el azadón o cuando se usa el machete; también hay energía cinética en las ondas de luz que provienen del sol. Otra forma de energía se conoce como energía potencial, lo cual se define como energía en descanso, capaz de hacer algún trabajo. Cuando la energía cinética está trabajando, parte ella se puede almacenar en forma de energía potencial. La energía que une los componentes moleculares de un elemento químico en la biomasa de una planta es una forma de energía potencial.

En el mundo físico y por lo tanto en los ecosistemas, la energía está moviéndose constantemente de un lugar a otro y cambiando sus formas. Dos leyes de la termodinámica explican y describen estos fenómenos de movimiento y cambio. De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, la energía no se crea ni se destruye sino que simplemente se transforma. La calidad de la energía cambia de una forma a otra a medida en que se mueve de un lugar a otro, o a me-

dida que es usada para hacer trabajo. La energía calorífica y la energía lumínica creadas por la quema de madera (más el potencial energético que contienen los restos, las cenizas), es igual a la energía potencial de la madera antes de quemarse más el oxígeno usado durante la combustión.

La segunda ley de la termodinámica indica que cuando la energía se transfiere o se transforma, parte de ella se convierte en una forma que no puede ser usada en otra forma y no está disponible para hacer ningún tipo de trabajo. Esta forma de energía conocida como calor, es energía degradada, la cual es simplemente el movimiento desorganizado de moléculas. La segunda ley de la termodinámica implica que siempre hay una tendencia hacia un mayor desorden o entropía. Para contrarrestar la entropía, es decir para crear orden, se tiene que usar energía.

La operación o funcionamiento de la segunda ley puede visualizarse claramente en un ecosistema natural: cuando la energía se transfiere de un organismo a otro en la forma de comida, gran parte de esa energía se degrada en forma de calor por la actividad metabólica, lo cual tiene como resultado un incremento neto de entropía. En otras palabras, los sistemas biológicos aparentemente pueden crear orden a partir del desorden, es decir no son afectados significativamente por la segunda ley de la termodinámica. Los ecosistemas naturales pueden hacer lo que se describió anteriormente debido al constante ingreso de energía, en forma de energía solar.

Para analizar el flujo de energía en cualquier sistema se requiere medir el uso de la energía. A pesar de que hay varias formas de medir la energía, en este Capítulo usaremos kilocalorías (kcal) como la unidad preferida, debido a que es la mejor forma de vincular la nutrición humana con la energía usada en la producción de alimentos. Otras unidades usadas para medir la energía y sus equivalentes, están en el Cuadro 18.1.

CUADRO 18.1 Medidas para la medición de energía

Unidad	Definición	Equivalencia
Caloría (cal)	Cantidad de calor necesario para subir 1°C la temperatura de 1 g de agua a 15°C	0,001 kcal 4,187 joule
Kilocaloría	Cantidad de calor necesario para subir 1°C la temperatura de 1 kg (litro) de agua a 15°C	1000 cal 4187 joule 3,968 btu
Unidad Térmica	Cantidad de calor necesario para subir 1°F la temperatura de 1 libra de agua Británica(btu)	252 cal 0,252 kcal
Joule	Cantidad de trabajo al mover un objeto 1 m de distancia en contra de una fuerza equivalente a 1 Newton	0,252 cal 0,000252 kcal

CAPTURA DE LA ENERGÍA SOLAR

El punto de inicio del flujo de energía a través de los ecosistemas y de los agroecosistemas es el sol. La energía emitida por el sol es capturada por las plantas y convertida en energía almacenada por los procesos fotosintéticos, discutidos en los Capítulos 3 y 4. La energía acumulada por las plantas durante la fotosíntesis se llama **productividad primaria**. Se llama así por que es la primera y más básica forma de energía almacenada en un ecosistema. La energía que permanece después de la respiración, usada para mantener a la planta, se conoce como productividad primaria neta y se mantiene almacenada en forma de biomasa. A través de la agricultura nosotros podemos concentrar esta energía almacenada en la biomasa que podemos cosechar y utilizar, ya sea para consumo directo o para alimentar animales, que podemos consumir o usar para que hagan algún trabajo para nosotros.

Diversas especies de plantas tienen diferente eficiencia en la captura de la energía solar y la transformación de ella en biomasa. La variación se explica por las diferencias en morfología vegetal (por ejemplo, área de hoja), eficiencia fotosintética y fisiología. También depende de las condiciones en las cuales la planta crece. Los cultivos son algunas de las plantas más eficientes; pero aún en su caso, la eficiencia de la conversión de la energía solar a biomasa raramente excede el 1% (esto quiere decir que solamente el 1% de la energía que llega a la planta se convierte en biomasa).

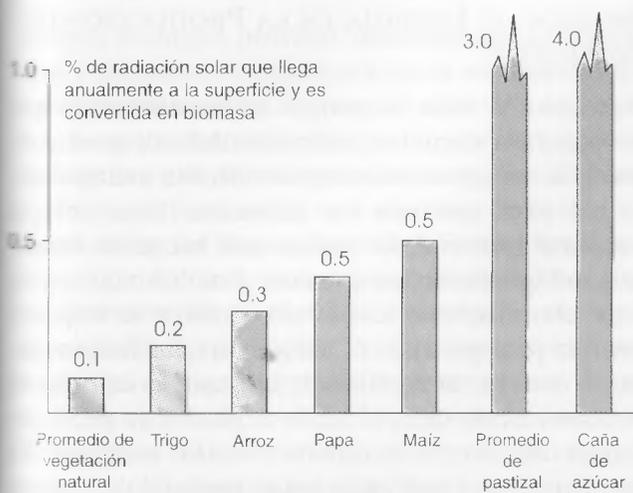


FIGURA 18.1

Eficiencia de la conversión de energía solar a biomasa. Fuente: Pimentel et al. (1978), Pimentel et al. (1990), Ludlow (1985).



FIGURA 18.2

Vacas lecheras alimentadas con dieta concentrada para incrementar la producción. Silos de maíz, alfalfa peletizada y otros suplementos alimenticios incrementan el costo energético de la producción de productos lácteos.

El maíz, considerado uno de los cultivos más productivos en términos de producción de alimentos por unidad de área de terreno, puede producir tanto como 15000 kg de peso seco/ciclo/ha. Esta biomasa representa alrededor del 0,5 % de la energía solar que llega al campo de cultivo durante un año (la base es el 1% de la luz de sol que llega al área durante la época de cultivo). El cultivo de papa, que produce alrededor de 40000 kg de producto fresco/ha (equivalente a 7000 kg de peso seco/ha), tiene una eficiencia de conversión de energía de alrededor del 0,4%. El trigo, con una producción de 27000 kg/ha y un peso seco de 6750 kg/ha, tiene solamente el 0,2% de eficiencia de conversión. La eficiencia de conversión energética para la caña de azúcar en áreas tropicales, alrededor del 4,0%, es uno de los valores más altos conocidos.

Aún cuando estos valores de eficiencia son relativamente bajos, es importante mencionar que son más altos que la eficiencia promedio de conversión de energía solar en biomasa en una vegetación madura natural; en este caso se estima que la eficiencia es de alrededor del 0,1% (Pimentel et al. 1978). También tenemos que considerar que muy poco de la biomasa de la vegetación natural está disponible para el consumo humano; por otro lado, un alto porcentaje de la energía almacenada en especies agrícolas es usado por el ser humano.

Debido a que gran parte del alimento consumido en países desarrollados no es biomasa vegetal sino biomasa animal, debemos también examinar la eficiencia de la conversión a partir de la energía almacenada en biomasa vegetal a carne o leche. La producción de biomasa animal a partir de biomasa vegetal es ineficiente, debido a que los animales pierden mucha energía por los procesos metabólicos requeridos para su mantenimiento y respiración.

El análisis que se hace de la conversión de biomasa vegetal a biomasa animal, se basa normalmente en la energía contenida en las proteínas de la biomasa animal, debido a que la carne y la leche son producidos principalmente por su proteína. Los animales es-

tabulados necesitan de 20 a 120 unidades de energía proveniente de plantas para producir una unidad de proteína; el rango depende del animal y del sistema de producción. Lo anterior equivale a una eficiencia entre 0,8% y 5%. Si estas eficiencias de conversión se combinan con aquellas para la producción de los alimentos para los animales, la ineficiencia de los sistemas de producción animal se hace evidente. Por ejemplo, los productos vegetales usados para el ganado estabulado, contienen alrededor del 0,5% de la energía solar que llegó al cultivo; si la proteína de la carne consumida del ganado contiene 0,8% de la energía que se usó para alimentarlo, esto implica una eficiencia general del 0,004% para producir proteínas a partir de la energía solar capturada por las plantas.

La ganadería en campo abierto debe ser considerada en forma diferente, debido a que normalmente los pastizales están en suelos que no pueden usarse para otras formas de agricultura y también, debido a que consumen alimentos directamente de un ecosistema natural o de pastizales, que requieren baja cantidad de energía. Los animales entonces pueden transformar la energía contenida en biomasa vegetal que no pueden usar los humanos directamente.

INSUMOS DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Aún cuando toda la energía en los alimentos que consumimos viene originalmente del sol, en el contexto de un agroecosistema se necesita energía adicional para producir ese alimento. Esta energía adicional proviene del trabajo que hacen los humanos, del que hacen los animales y del trabajo que se hace con maquinaria. Además, también se requiere energía para producir la maquinaria, las herramientas, la semilla, el fertilizante, el riego, la cosecha, la transformación de la cosecha original a un producto industrializado y el transporte hacia los mercados. Es necesario examinar todos estos insumos de energía de los agroecosistemas, para entender el costo energético de la agricultura y así, desarrollar las bases para un uso sostenible de la energía en agricultura.

Primero distinguiremos los diferentes tipos de ingresos de energía en los agroecosistemas. Por un lado, hay ingreso de energía proveniente de la radiación solar, llamada **entrada de energía ecológica** y por otro lado, **el insumo de energía cultural**, proveniente de fuentes antropogénicas. Los insumos de energía cultural pueden subdividirse en biológica e industrial. La

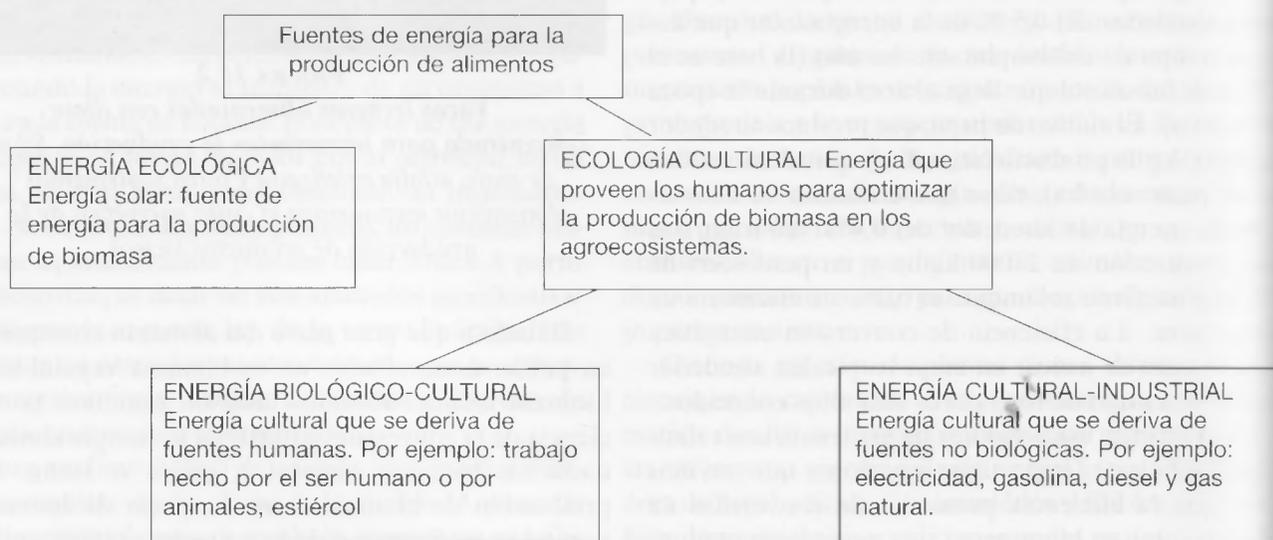


FIGURA 18.3

Tipos de ingresos energéticos en agricultura. La energía biológico-cultural y la energía cultural-industrial, pueden provenir de fuera de un agroecosistema en particular (en este caso es una forma de insumo externo) o pueden ser derivados de fuentes que integran el agroecosistema.

energía biológica proviene directamente de organismos e incluye el trabajo que hace el ser humano, que hacen los animales y el compost o abonos orgánicos. La energía industrial se deriva del petróleo, de fisión radioactiva y de fuentes geotérmicas e hidrológicas.

Es importante notar que aún cuando nos referimos a todas las fuentes de energía como "ingresos", la energía cultural, en cualquiera de sus formas, puede derivarse de fuentes ubicadas dentro de algún agroecosistema particular. De este modo, esta forma específica de energía cultural no es un insumo del sistema, en el sentido en el que hemos estado usando este término. Tales "insumos internos" de energía incluyen el trabajo de los agricultores que viven en la granja, el estiércol de los animales que viven en la granja, y la energía de los molinos o turbinas de viento ubicadas en la granja. Por granja también podemos entender rancho, agroecosistema o parcela.

Insumos de Energía Cultural y Egresos por Cosecha

Desde el punto de vista de sostenibilidad, un aspecto clave del flujo de energía en los agroecosistemas es entender cómo la energía cultural es usada para dirigir la conversión de energía ecológica a biomasa. Mientras más grandes son las modificaciones a los procesos naturales que los humanos imponen al ambiente, en donde se están produciendo alimentos, más grandes también son las cantidades de energía cultural requeridas. Se necesita energía para mantener un sistema de baja diversidad, para limitar la interferencia y para modificar las condiciones físicas y químicas del sistema, con el fin de mantener el crecimiento óptimo y el buen desarrollo de los cultivos.

Insumos mayores de energía cultural permiten, ciertamente, gran productividad. Sin embargo, no hay una relación de paridad entre ambos; es decir, energía cultural y productividad. Cuando el insumo de energía cultural es muy alta, el "retorno" de la "inversión" de la energía cultural es a menudo mínimo. Debido a que los egresos de un agroecosistema pueden ser medidos en términos de energía, podemos entonces evaluar la eficiencia del uso de energía en el agroecosistema con una simple comparación: la cantidad de energía contenida en la biomasa cosechada, comparada con la cantidad de energía cultural requerida para producir esa biomasa. Al analizar varios

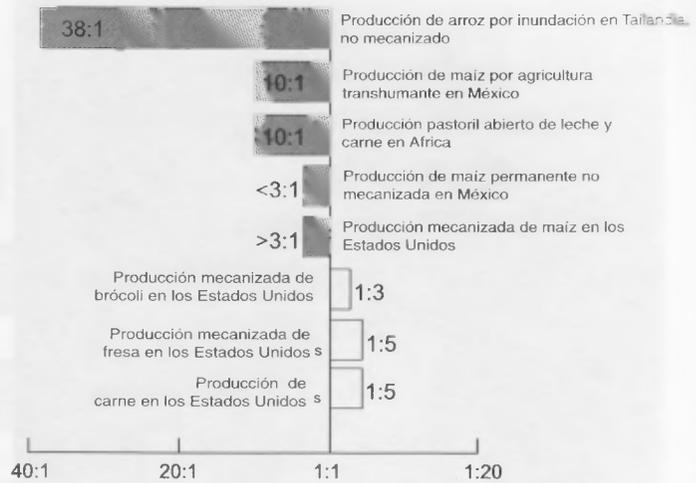


FIGURA 18.4

Comparación de las tasas de retorno con respecto a la energía invertida en varios agroecosistemas. Las barras hacia la izquierda indican los sistemas en los que el egreso de energía es mayor que el insumo. Las barras hacia la derecha indican que el insumo de energía es mayor que el valor energético del alimento cosechado.

Fuente: Pimentel (1980); Cox y Atkins (1979).

agroecosistemas en diversas partes del mundo esta relación varía, desde una en la cual más energía se obtiene de la que es adicionada, a otra en la que los insumos de energía, especialmente energía cultural, son mayores que la energía cosechada.

Los agroecosistemas no mecanizados (ejemplo, pastoreo o agricultura transhumante), que usan solamente energía cultural biológica en la forma de trabajo humano, son capaces de obtener retornos que varían de 5 a casi 40 calorías de energía en forma de comida, por cada caloría de energía cultural invertida en el sistema. Los sistemas de cultivo permanente que usan animales, tienen un insumo mayor de energía cultural, pero debido a que también tienen cosechas más altas, todavía mantienen retornos favorables con respecto a la energía invertida.

En agroecosistemas mecanizados, altas cantidades de insumos de energía cultural industrializada, reemplazan la mayoría de energía cultural biológica; esto permite altos niveles de rendimiento, pero al mismo tiempo, reduce significativamente la eficiencia del



FIGURA 18.5

Cultivo de café creciendo bajo árboles de sombra nativos en Veracruz, México. En este agroecosistema el café sustituye a las especies de baja altura, sin alterar el dosel de los árboles nativos grandes. Debido a que el sistema se altera muy poco, solamente se requieren pequeñas cantidades de energía cultural para mantener la productividad del sistema. Foto cortesía de Carlos Guadarrama y Laura Trujillo.

uso de energía. En la producción de granos tales como maíz, trigo y arroz, estos agroecosistemas pueden rendir de 1 a 3 calorías de energía en forma de alimento por caloría de energía cultural. En la producción mecanizada de frutas y verduras, el retorno de energía es, en el mejor de los casos, igual a la cantidad de energía invertida y en otros casos, es menor el retorno. En la producción de alimentos de origen animal, en la mayoría de los casos, la relación es aún menos favorable. Por ejemplo, en los Estados Unidos, para la producción de carne de res, se necesitan cinco calorías de energía cultural por cada caloría obtenida en la carne.

Debido a que el alimento de origen animal se valora más por su contenido de proteína que por el total de energía, nosotros deberíamos considerar también la eficiencia energética de su producción en términos de la energía en la proteína, exclusivamente de esos alimentos comparados con la energía que se usó para la alimentación del animal. En estos términos, cada caloría de proteína en leche, carne de cerdo o de res, requiere alrededor de 30 y 80 calorías de energía para su producción. Este valor de 30-80 calorías es muy alto, comparado con las tres calorías de energía cultural que se necesitan para producir proteínas de origen vegetal (el valor de tres calorías proviene de granos que producen proteínas). Aún la producción de proteínas concentradas de origen vegetal (por ejemplo tofú de soya) no lleva más de 20 calorías de energía por cada caloría de proteína.

Los datos mostrados en la Figura 18.4, refuerzan la posición de que los requerimientos de energía cultural en la agricultura, están relacionados muy de cerca con los niveles de modificación de los procesos en los ecosistemas naturales. Los costos son pequeños cuando los humanos dejan la estructura básica de los ecosistemas intactos. Cuando se hacen algunas modificaciones pequeñas para incrementar la abundancia de una especie de cultivo de nuestro interés, se requiere mayor cantidad de energía cultural; aún así, el retorno es favorable. Cuando un ecosistema natural complejo se reemplaza por un monocultivo, que tiene una forma de vida muy diferente a la de las especies nativas —como es el caso del algodón de riego en las tierras áridas al oeste del Valle de San Joaquín en California— los costos de energía cultural se incrementan significativamente. Cuando la meta es también incrementar el nivel de energía solar capturada (productividad) más alto que la que utilizaba el sistema natural, los niveles de uso de energía cultural también se incrementan significativamente.

La Figura 18.6 ofrece otra perspectiva en lo que respecta a los costos de energía y a los beneficios energéticos de diferentes tipos de agroecosistemas. Aún cuando el uso de grandes cantidades de energía cultural permite a los agroecosistemas convencionales ser más productivos que otros tipos de agroecosistemas; esos otros no toman en cuenta el factor energético en su productividad. La producción de alimentos puede ser más eficiente desde el punto de vista energético, si reducimos los insumos de energía

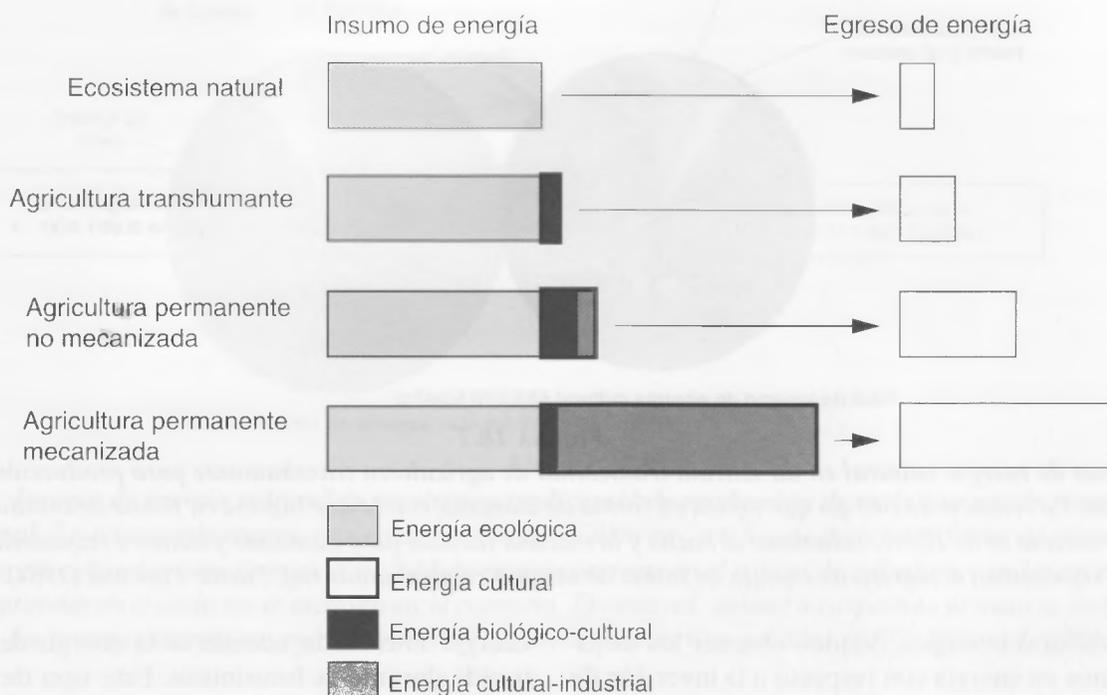


FIGURA 18.6

Cantidad relativa aproximada de insumos y egresos de energía en cuatro diferentes tipos de sistemas. La cantidad real del ingreso energético para cada sistema es mayor del que aquí se muestra. Nótese que para el sistema de agricultura moderna mecanizada, la cantidad total de egreso de energía es menor que el insumo de energía cultural; esta diferencia a menudo es mayor que la que aquí se muestra.

cultural industrial, incrementamos nuestra inversión en energía cultural biológica y cambiamos la forma actual de cómo se usa la energía cultural industrializada.

La energía biológica cultural es renovable. También es eficiente al facilitar la producción de biomasa cosechable. Como vimos anteriormente, algunos agroecosistemas que dependen principalmente de la

Uso de la Energía Cultural Biológica

La energía cultural biológica es cualquier insumo de energía que tiene una base biológica, bajo el control o manejo por parte de seres humanos. Esto incluye el trabajo humano, el trabajo de los animales manejados por humanos y los subproductos de los animales usados por humanos tales como el compost. El Cuadro 18.2 presenta algunas de las diferentes formas de energía biológica cultural y los valores aproximados en kilocalorías.

CUADRO 18.2 Contenido energético de diversas fuentes de energía biológico-cultural usadas en agricultura

Tipo de insumo	Valor energético
Trabajo humano pesado (uso de machete)	400-500 kcal/hora
Trabajo humano ligero (manejando un tractor)	175-200kcl/hora
Trabajo animal fuerte	2 400 kcl/hora
Producción local de semilla	4 000 kcal/kg
Estiércol de ganado vacuno	1 611 kcal/kg
Estiércol de ganado porcino	2 403 kcal/kg
Compost comercial	2 000 kacl/kg
Biogás	1 730 kcl/kg

Fuente: Cox y Atkins (1979), Pimentel (1984), Zhenfang (1994).

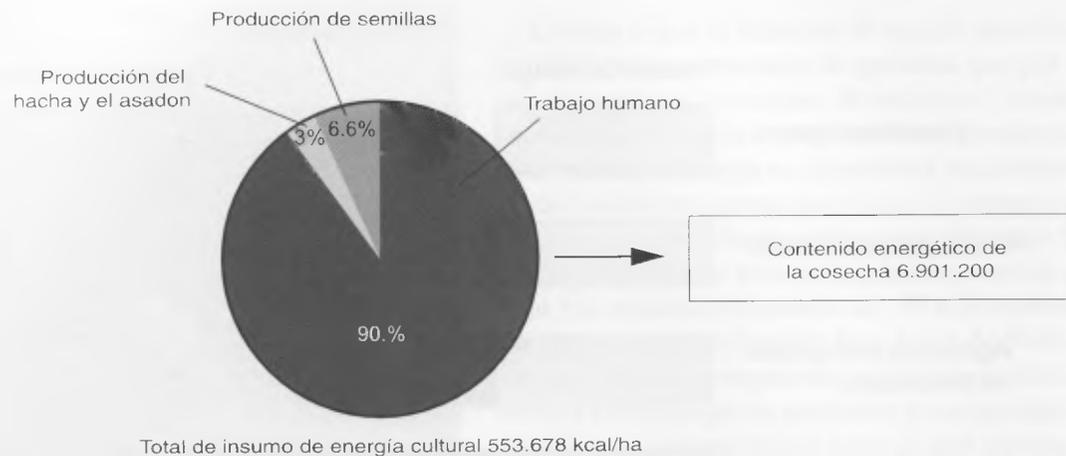


FIGURA 18.7

Insumos de energía cultural en un sistema tradicional de agricultura transhumante para producción de maíz en México. La relación de energía que egresa en forma de alimento, con la que ingresa en forma de insumo cultural en este sistema es de 12,5:1. Solamente el hacha y la macana (usados para desmonte y siembra respectivamente) representan el ingreso de energía en forma de insumo cultural-industrial. Fuente Pimentel (1984).

energía cultural biológica, pueden obtener los mejores retornos en energía con respecto a la inversión de ésta en el sistema.

El trabajo humano ha sido un elemento clave de energía cultural en la agricultura desde sus inicios. En muchas partes del mundo continúa siendo la fuente principal de ingreso de energía, junto con el trabajo animal. Por ejemplo, en los sistemas de agricultura transhumante, el trabajo humano es la única forma de

energía adicionada, además de la energía del sol capturada durante la fotosíntesis. Este tipo de sistemas tiene un rango de 10:1 y hasta 40:1 en relación con energía obtenida versus energía usada (Rappaport 1971, Pimentel 1980). La Figura 18.7 muestra un ejemplo del presupuesto energético de un cultivo tradicional de agricultura transhumante en México.

Existen muchos tipos de sistemas de producción de alimentos tradicionales, no mecanizados, en don-



FIGURA 18.8
Arado con uso de bueyes para el cultivo de maíz, cerca de Cuenca, Ecuador. La mayor parte de la energía usada en este sistema es de carácter renovable, de fuentes locales.

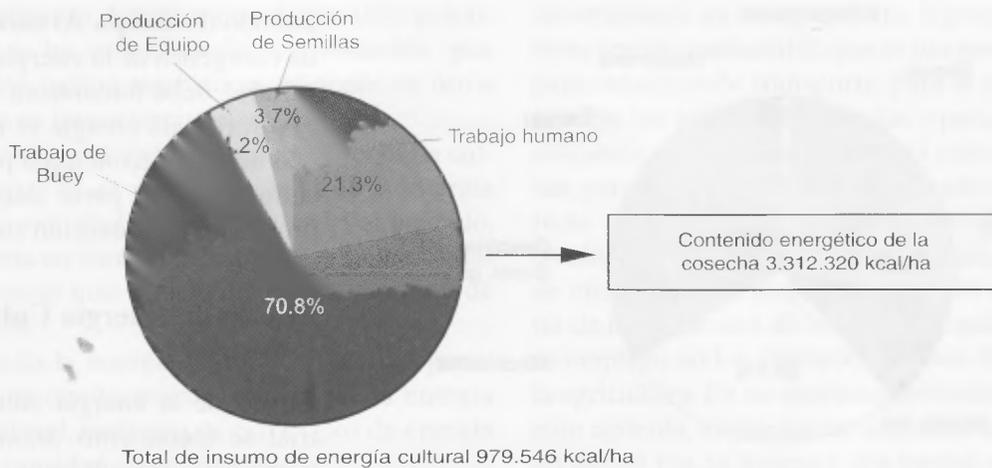


FIGURA 18.9

Insumo de energía cultural en un sistema tradicional de producción de maíz con uso de tracción animal. La relación de energía que egresa en forma de alimento, con la que ingresa en forma de insumo de energía cultural en este sistema es de 3,4:1. la energía presente en el cultivo de cobertura y en las arvenses incorporadas en el suelo no se incluyen en la ecuación. El estiércol animal incorporado al suelo se incluye en los insumos energéticos provenientes de los bueyes. Fuente: Cox y Atkins (1979), Pimentel (1980).

de la principal fuente de energía es la biológica cultural. En estos casos, hay una ganancia neta de energía capturada por los cultivos, comparada con la energía gastada en el sistema de cultivo. En agroecosistemas pastoriles, en donde la principal actividad humana es el cuidado de los animales y donde éstos obtienen su alimento de la vegetación natural, la proporción de energía producida en el alimento versus la cantidad de energía invertida en el sistema, varía entre 3:1 y 10:1. Aún en sistemas de cultivo intensivos, no mecanizados, también se puede mantener un balance de energía favorable en la producción de alimentos. Por ejemplo, en el sureste de Asia los sistemas de producción de arroz han mostrado ganancias de hasta 38 calorías en el alimento producido, por cada caloría de energía cultural usada para mantener el sistema.

La cantidad de energía que utiliza el ser humano en el trabajo que desempeña en estos sistemas agrícolas, se calcula mediante la determinación de cuántas calorías quema una persona mientras está trabajando en su cultivo. Aún cuando esta técnica proporciona una buena fuente de datos confiables, no considera muchos otros factores. Entre esos factores está la cantidad de energía que se requiere para el crecimiento de las plantas mientras se está trabajando; también se debe tomar en cuenta la cantidad de energía que deben tener los trabajadores para cubrir

sus necesidades básicas, mientras ellos no están trabajando en los cultivos. Si tomamos en cuenta estos factores, la cantidad de energía utilizada por el ser humano en labores agrícolas se incrementa. Por otra parte, las necesidades básicas (respiración, metabolismo) de las personas existen, ya sea cuando están trabajando en labores agrícolas o cuando están descansando. Tomando en cuenta esto último, los cálculos podrían reducir el costo energético del trabajo humano, considerando únicamente la energía extra que se requiere para hacer los trabajos en los campos agrícolas.

En muchos agroecosistemas que funcionan basados principalmente en energía biológico-cultural, los animales juegan un papel importante en el cultivo del suelo, transportando materiales, convirtiendo biomasa en abono y produciendo alimentos ricos en proteínas tales como carne y leche. El uso de los animales en agricultura se incrementó significativamente durante el período de transición de agricultura nómada a agricultura fija.

Aun cuando el uso del trabajo animal incrementa el total de la energía biológico-cultural usada en la agricultura, esto reduce la proporción entre energía cosechada y energía invertida en el sistema, en un rango aproximadamente de 3:1, lo cual permite la consolidación de una agricultura fija en lugar de una

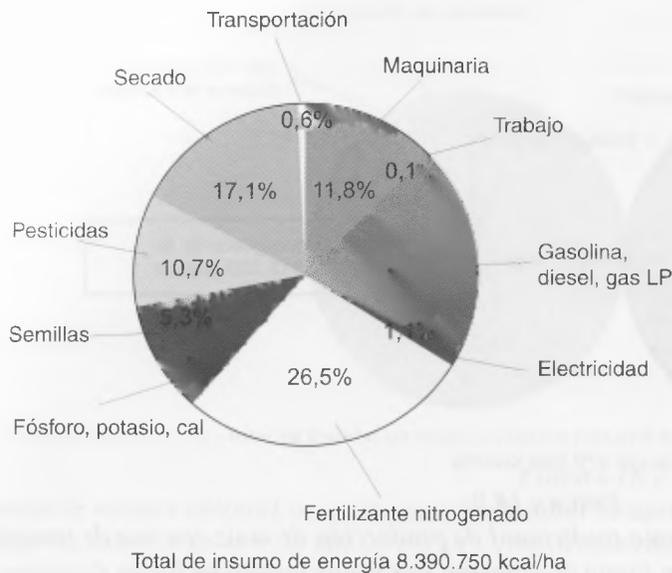


FIGURA 18.10

Insumo de energía por hectárea para la producción de maíz en los Estados Unidos en 1980. El promedio de producción total de grano fue de 7 000 kg/ha; la relación en kcal de egreso: insumo, fue de 2,9:1. Fuente: Pimentel (1984).

agricultura nómada, incrementa el área que puede ser cultivada, produce abono para fertilizar el suelo y permite la obtención de productos como carne, leche y otras de fuente animal. Adicionalmente, los animales consumen biomasa que no puede ser consumida directamente por los seres humanos; esto reduce los costos energéticos del sistema. La Figura 18.9 muestra un ejemplo de la eficiencia energética en la producción de maíz usando a los animales como parte del sistema.

La energía biológico-cultural es un componente importante de la agricultura sostenible. La energía que proviene de los seres humanos y de sus animales generalmente es renovable; esto permite transformar en mayor proporción la energía solar en energía almacenada en forma de alimento. El uso del trabajo humano y de los animales se explica con la primera ley de la termodinámica; esto es que se alteran los procesos naturales de los ecosistemas, concentrando la energía en productos útiles. Al mismo tiempo, el sistema obedece a la segunda ley de la termodinámica al permitir la entrada de la luz del sol como principal fuente de energía, pero utilizando materiales generados en los ciclos anteriores. De esta forma el agroecosistema es capaz de sostenerse por un largo

período de tiempo. Al hacer un análisis energético de la energía biológico-cultural, debe tomarse en cuenta que esta forma de energía es mucho más que un costo económico para la agricultura, es una parte integral de los procesos de producción sostenibles.

El Uso de Energía Cultural-Industrial

El uso de la energía cultural-industrial se incrementó dramáticamente cuando la agricultura se mecanizó. Esto incrementó significativamente la productividad pero al mismo tiempo cambió dramáticamente la naturaleza de la producción agrícola. El trabajo animal y de los humanos se desplazó y la agricultura se vinculó muy fuertemente al consumo de productos derivados del petróleo.

Hoy los agroecosistemas convencionales dependen mucho de la energía cultural-industrial. La producción de maíz en los Estados Unidos, es un buen ejemplo de un agroecosistema en el que casi toda la energía que se utiliza viene de fuentes industriales. La Figura 18.10 muestra el total de insumos energéticos por hectárea en la producción de maíz, y cómo se distribuye esta energía entre las diferentes partes del sistema. La energía biológico-cultural, en forma de trabajo humano, es una parte mínima de este sistema.

Los cambios que han ocurrido a partir de la Segunda Guerra Mundial en la forma en que la energía cultural se usa para producir maíz, es un buen ejemplo de cómo ha cambiado el uso de energía en la agricultura en general. Entre 1945 y 1983, la producción de maíz en los Estados Unidos se incrementó 300 %; sin embargo, el consumo de energía se incrementó más del 500 %. Se calcula que en 1945 la relación de energía que se cosechaba con la energía usada para la producción del maíz oscilaba entre 3,5:1 y 5,5:1. En 1975 esta relación había declinado a 3,2:1 y 4,1:1; en 1983 el valor era de 2,3:1 (Smil *et al.* 1983, Pimentel 1992). Con la continua intensificación del uso de insumos en la agricultura durante el último decenio, la relación antes mencionada posiblemente es aún más

bajo, especialmente debido a que desde 1985 prácticamente no se ha incrementado la producción por hectárea. Este patrón también es evidente en otros cultivos de gran importancia en el mundo.

Desde el punto de vista energético, la energía cultural-industrial es de mayor calidad que la energía solar y que la energía biológico-cultural. Por ejemplo, una kilocaloría en forma de petróleo, es capaz de hacer dos mil veces más trabajo que una kilocaloría de radiación solar.

Aun cuando la energía cultural-industrial generalmente es de mucha mayor calidad que la energía biológico-cultural, cada uno de estos tipos de energía varían en la cantidad de energía que se requirió para proporcionar la calidad de esa energía. Por ejemplo, una kilocaloría de electricidad, puede hacer cuatro veces más trabajo que una kilocaloría de petróleo, pero mucha más energía se gastó para crear la electricidad. Como nos indican las leyes de la termodinámica, los seres humanos necesitan usar energía para concentrar energía; en este proceso la energía no puede ser creada, no hay que olvidar esto. Así, debemos preocuparnos tanto por la cantidad absoluta de trabajo que puede realizar una kilocaloría proveniente de cierta forma de energía, como del total de energía que se usa para transformar nuevamente la energía en alguna otra forma usable. En este contexto, podemos comparar el uso de la energía cultural-industrial. El Cuadro 18.3 presenta rangos de costos de energía para cada una de las fuentes energéticas industriales comúnmente usadas.

La energía cultural-industrial se usa directa o in-

directamente en la agricultura. Ejemplos de uso directo son el combustible que se usa para los tractores, para vehículos de transporte, para la maquinaria que procesa los productos agrícolas o para las bombas de irrigación, también se incluye el combustible que se usa para enfriar o calentar invernaderos. El uso indirecto de ese tipo de energía incluye por ejemplo: el combustible, energía eléctrica o cualquier otro tipo de energía usado para la producción de la maquinaria de los vehículos, de los insumos químicos, etc., que se emplean en los diversos procesos de operación en la agricultura. En un sistema convencional de producción agrícola, alrededor de un tercio de la energía total que se usa es directa y dos tercios es indirecta.

La producción de fertilizantes, especialmente los nitrogenados, consume la mayoría de la energía indirecta usada en la agricultura. Casi un tercio de toda la energía usada en la agricultura moderna se consume en la producción de fertilizantes nitrogenados. Este alto costo se explica porque el nitrógeno es usado intensamente en la agricultura y porque se requieren grandes cantidades de energía para producirlo. En la producción de maíz, por ejemplo, aproximadamente 152 kg de nitrógeno/ha, en forma de fertilizante, se aplica a los cultivos; esto representa el 28 % del total de ingreso de energía por hectárea (Pimentel 1992). Este ingreso de energía puede ser reducido significativamente mediante el uso de composts y abonos, la fijación biológica de nitrógeno y el reciclaje.

Otro 15% de la energía indirecta proviene de la producción de plaguicidas. Este valor se incrementa cuando tomamos en cuenta el empaque, el transporte a los campos de cultivo y la formulación del producto en una forma utilizable. A pesar de que los nuevos plaguicidas son aplicados en cantidades más pequeñas que en el pasado, contienen cantidades más altas de energía.

La mayor parte de la energía cultural-industrial que se usa en la agricultura, tanto directa como indirectamente, proviene de petróleo fósil o depende de este petróleo para su

CUADRO 18.3 Costo energético aproximado de insumos industriales comúnmente usados en agricultura

Maquinaria (promedio de camionetas y tractores)	18.000 kcal/kg
Gasolina (incluyendo refinación y transporte)	16.500 kcal/l
Diesel (incluyendo refinación y transporte)	11.450 kcal/l
Gas LP (incluyendo refinación y transporte)	7.700 kcal/l
Electricidad (incluyendo generación y transmisión)	3.100 kcal/kwh
Nitrógeno (como nitrato de amonio)	14.700 kcal/kg
Fósforo (como superfosfato triple)	3.000 kcal/kg
Potasio (como ceniza de potasio)	1.860 kcal/kg
Cal (incluyendo extracción y procesamiento)	295 kcal/kg
Insecticidas (incluyendo su manufacturación)	85.680 kcal/kg
Herbicidas (incluyendo su manufacturación)	111.070 kcal/kg

Fuente: Fluck (1992).

pero el petróleo no siempre va a estar disponible en las cantidades requeridas. Adicionalmente, el petróleo está vinculado virtualmente con cualquier otra fuente de insostenibilidad en nuestra producción de alimentos.

Problemas debidos al Uso Intensivo del Petróleo

Desde hace algunos decenios, el incremento en el consumo de energía en la agricultura, ha jugado un papel importante en el incremento de la cantidad de alimento producido. Sin embargo, como se describió anteriormente, mucha de esta energía proviene de

otros ecosistemas, especialmente en áreas de agricultura mecanizada. Un trabajo reciente sobre emisiones de gas a partir de fertilizantes nitrogenados (N_2O y NO), ha mostrado que la adición de esos materiales a la atmósfera tiene un impacto importante en el ciclo del nitrógeno a nivel global, causando daños a la capa de ozono favoreciendo el problema de calentamiento global. Por otra parte, la simplificación de sistemas agrícolas, siempre acompañada de energía industrial, está causando problemas mayores de pérdida de biodiversidad en las regiones.

Desde una perspectiva socioeconómica, la dependencia excesiva del petróleo como fuente de energía

manufactura. Otras fuentes de energía industrial en general, juegan un papel pequeño en la agricultura, aunque en ciertas ocasiones pueden ser importantes a escala local. Un estudio del consumo energético en la producción de maíz en Indiana, mostró que más del 90 % de la energía industrial usada en el sistema provino de petróleo fósil, y menos del 2 % del total de energía requerida para la producción, provino de energía renovable biológico-cultural en forma de trabajo humano (Doering 1977). Cuando la producción agrícola depende tanto del petróleo fósil, cualquier factor que afecte el costo o disponibilidad de este tipo de energía puede tener un impacto dramático en la agricultura.

De acuerdo con Pimentel *et al.* (1990), la tendencia actual del uso de petróleo fósil en la agricultura, tendrá que continuar incrementándose si se requiere producir las cantidades esperadas. Esto puede provocar un consumo más rápido de las reservas mundiales de petróleo y a la vez, representa una competencia fuerte para el uso de esta fuente de energía.

HACIA UN USO SOSTENIBLE DE ENERGÍA EN AGROECOSISTEMAS

Al analizar la agricultura en el contexto del uso de energía, encontramos que ésta es un factor importante para determinar la sostenibilidad del sistema. Actualmente, la agricultura convencional está usando mucho más energía para producir la energía contenida en los alimentos cosechados, y mucha de la energía que se invierte en estos sistemas proviene de fuentes no renovables. Somos dependientes del petróleo fósil para la producción de nuestros alimentos; pero el petróleo no siempre va a estar disponible en las cantidades requeridas. Adicionalmente, el petróleo está vinculado virtualmente con cualquier otra fuente de insostenibilidad en nuestra producción de alimentos.

Problemas debidos al Uso Intensivo del Petróleo

Desde hace algunos decenios, el incremento en el consumo de energía en la agricultura, ha jugado un papel importante en el incremento de la cantidad de alimento producido. Sin embargo, como se describió anteriormente, mucha de esta energía proviene de

fuentes industriales; la gran mayoría se basa en el uso de petróleo. Si esta misma estrategia continúa, con el crecimiento de la población mundial, van a emerger problemas críticos. Algunos de esos problemas son de naturaleza ecológica y otras son de naturaleza económica y social.

Como hemos visto en los capítulos anteriores de este libro, cuando se ignoran los procesos ecológicos, la degradación ambiental comienza a afectar los agroecosistemas. El uso intenso de energía cultural ha enmascarado y nos ha hecho ignorar esos procesos ecológicos. La aplicación de fertilizantes inorgánicos enmascara la reducción de la fertilidad en el suelo; el uso de plaguicidas contribuye y esconde, la reducción de la biodiversidad en sistemas agrícolas. Sin embargo, las consecuencias de ignorar los procesos ecológicos actualmente son cada vez más evidentes. A nivel de campos agrícolas, el cambio hacia el uso intensivo de maquinaria y sustancias químicas basadas en petróleo, conduce a problemas de pérdida de materia orgánica, lixiviación de nutrientes, degradación del suelo e incremento de su erosión. Las fuentes de agua se han contaminado y el excesivo bombeo de agua del manto freático para riego, ha degradado los acuíferos con la consecuente falta de agua para agricultura y otros usos. Las plagas y enfermedades han desarrollado resistencia al uso de plaguicidas y estos productos han contaminado tanto el ambiente en el área de cultivo, como los ecosistemas naturales y han causado problemas de salud a los agricultores y trabajadores agrícolas, además de destruir poblaciones de insectos y microorganismos benéficos.

Fuera del área de cultivo, la erosión del suelo causada por el viento y el agua, asociada con la agricultura mecanizada, ha tenido impactos negativos en otros ecosistemas, especialmente en áreas río abajo. Un trabajo reciente sobre emisiones de gas a partir de fertilizantes nitrogenados (N_2O y NO), ha mostrado que la adición de esos materiales a la atmósfera tiene un impacto importante en el ciclo del nitrógeno a nivel global, causando daños a la capa de ozono y favoreciendo el problema de calentamiento global. Por otra parte, la simplificación de sistemas agrícolas, siempre acompañada de energía industrial, está causando problemas mayores de pérdida de biodiversidad en las regiones.

Desde una perspectiva socioeconómica, la dependencia excesiva del petróleo como fuente de energía

en la agricultura, va mucho más allá del aspecto de la eficiencia del uso de energía. La dependencia del petróleo indica que hay mayor vulnerabilidad a los cambios en el precio y la disponibilidad de ese producto. Como vimos durante la crisis del petróleo en 1973 y que se repitió brevemente durante la guerra del Golfo en 1991, el precio del petróleo puede incrementarse súbitamente, subiendo así los costos de producción agrícola. A medida que el consumo del petróleo aumenta en el mundo, los riesgos que enfrenta la agricultura basada en el petróleo también se incrementan significativamente. El problema se hace más difícil cuando los países en vías de desarrollo se ven forzados a intensificar sus sistemas agrícolas para producir los alimentos que necesitan.

Otro problema de la agricultura basada en el petróleo es que este tipo de agricultura a gran escala, mecanizada, está desplazando a la agricultura tradicional; por lo tanto, está forzando la migración humana hacia las ciudades, irrumpiendo los vínculos culturales y degradando la capacidad de grupos humanos para producir sus propios alimentos.

Lineamientos Futuros con Respecto a la Energía

Con base en lo anterior queda claro que los sistemas sostenibles de producción de alimentos dependen, en gran medida, de un uso más eficiente de la energía y de la reducción del uso de energía industrial-cultural, que proviene de fuentes no renovables, especialmente del petróleo. Como se sugiere en este Capítulo, la clave para un uso sostenible de energía en la agricultura radica en ampliar el uso de la energía biológico-cultural. Los insumos biológicos no solamente son renovables, sino que tienen la ventaja de que están disponibles y pueden ser controlados localmente, que no dañan al ambiente y que contribuyen a mejorar los aspectos ecológicos de los agroecosistemas.

Muchas de las opciones basadas en factores ecológicos que se presentan en este libro, están relacionadas directamente con la eficiencia de la energía. Algunas de las estrategias para un uso más eficiente de la energía en la agricultura sostenible son:

1. Reducir el uso de la energía industrial-cultural, especialmente la que proviene de fuentes no renovables o contaminantes, tales como el petróleo.

- Usar sistemas de labranza mínima o labranza reducida que requieren menor uso de maquinaria.
 - Usar prácticas que reduzcan el uso de agua y las pérdidas de ésta, con el fin de reducir la cantidad de energía que se usa para riego.
 - Usar rotación de cultivos y asociaciones que estimulen la recuperación de los daños causados por los disturbios de cada uno de los ciclos de cultivos, sin la necesidad de usar insumos artificiales.
 - Desarrollar fuentes renovables de energía industrial-cultural eficiente para reemplazar el petróleo y sus derivados.
 - Usar fuentes alternativas de energía cultural-industrial, tales como sistemas fotovoltaicos, turbinas de viento, hidroplantas a pequeña escala, cada vez que sea posible.
 - Usar la energía cultural-industrial en forma más eficiente; por ejemplo, reduciendo desperdicios y haciendo una mejor combinación entre la calidad de la energía y su uso.
 - Reducir el consumo de productos animales y, para aquellos productos animales que sean consumidos, usar los que provengan de ganadería abierta, es decir no estabulada.
 - Reducir el uso de energía en el sector agrícola mediante la regionalización de la producción, así como vincular a consumidores y productores más directamente tanto geográficamente como por la temporada de los cultivos.
2. Incrementar el uso de energía biológico cultural.
 - Entender el uso de energía humana como una parte integral del flujo de energía en la agricultura, no como un costo económico que debe ser reducido o eliminado.
 - Regresar los nutrientes a los campos de cultivo de donde se obtuvo la cosecha. Los nutrientes fueron obtenidos en ese lugar.
 - Usar los composts más extensivamente para mantener la calidad y fertilidad del suelo.
 - Incrementar el uso de productos agrícolas locales, con el fin de disminuir los costos energéticos de transporte a largas distancias.
 - Expandir el uso del control biológico y del manejo integrado de plagas.

en la agricultura, va mucho más allá del aspecto de la eficiencia del uso de energía. La dependencia del petróleo indica que hay mayor vulnerabilidad a los cambios en el precio y la disponibilidad de ese producto. Como vimos durante la crisis del petróleo en 1973 y que se repitió brevemente durante la guerra del Golfo en 1991, el precio del petróleo puede incrementarse súbitamente, subiendo así los costos de producción agrícola. A medida que el consumo del petróleo aumenta en el mundo, los riesgos que enfrenta la agricultura basada en el petróleo también se incrementan significativamente. El problema se hace más difícil cuando los países en vías de desarrollo se ven forzados a intensificar sus sistemas agrícolas para producir los alimentos que necesitan.

Otro problema de la agricultura basada en el petróleo es que este tipo de agricultura a gran escala, mecanizada, está desplazando a la agricultura tradicional; por lo tanto, está forzando la migración humana hacia las ciudades, irrumpiendo los vínculos culturales y degradando la capacidad de grupos humanos para producir sus propios alimentos.

Lineamientos Futuros con Respecto a la Energía

Con base en lo anterior queda claro que los sistemas sostenibles de producción de alimentos dependen, en gran medida, de un uso más eficiente de la energía y de la reducción del uso de energía industrial-cultural, que proviene de fuentes no renovables, especialmente del petróleo. Como se sugiere en este Capítulo, la clave para un uso sostenible de energía en la agricultura radica en ampliar el uso de la energía biológico-cultural. Los insumos biológicos no solamente son renovables, sino que tienen la ventaja de que están disponibles y pueden ser controlados localmente, que no dañan al ambiente y que contribuyen a mejorar los aspectos ecológicos de los agroecosistemas.

Muchas de las opciones basadas en factores ecológicos que se presentan en este libro, están relacionadas directamente con la eficiencia de la energía. Algunas de las estrategias para un uso más eficiente de la energía en la agricultura sostenible son:

1. Reducir el uso de la energía industrial-cultural, especialmente la que proviene de fuentes no renovables o contaminantes, tales como el petróleo.

- Usar sistemas de labranza mínima o labranza reducida que requieren menor uso de maquinaria.
 - Usar prácticas que reduzcan el uso de agua y las pérdidas de ésta, con el fin de reducir la cantidad de energía que se usa para riego.
 - Usar rotación de cultivos y asociaciones que estimulen la recuperación de los daños causados por los disturbios de cada uno de los ciclos de cultivos, sin la necesidad de usar insumos artificiales.
 - Desarrollar fuentes renovables de energía industrial-cultural eficiente para reemplazar el petróleo y sus derivados.
 - Usar fuentes alternativas de energía cultural-industrial, tales como sistemas fotovoltaicos, turbinas de viento, hidroplantas a pequeña escala, cada vez que sea posible.
 - Usar la energía cultural-industrial en forma más eficiente; por ejemplo, reduciendo desperdicios y haciendo una mejor combinación entre la calidad de la energía y su uso.
 - Reducir el consumo de productos animales y, para aquellos productos animales que sean consumidos, usar los que provengan de ganadería abierta, es decir no estabulada.
 - Reducir el uso de energía en el sector agrícola mediante la regionalización de la producción, así como vincular a consumidores y productores más directamente tanto geográficamente como por la temporada de los cultivos.
2. Incrementar el uso de energía biológico cultural.
 - Entender el uso de energía humana como una parte integral del flujo de energía en la agricultura, no como un costo económico que debe ser reducido o eliminado.
 - Regresar los nutrientes a los campos de cultivo de donde se obtuvo la cosecha. Los nutrientes fueron obtenidos en ese lugar.
 - Usar los composts más extensivamente para mantener la calidad y fertilidad del suelo.
 - Incrementar el uso de productos agrícolas locales, con el fin de disminuir los costos energéticos de transporte a largas distancias.
 - Expandir el uso del control biológico y del manejo integrado de plagas.

- Fomentar la formación de micorrizas en las raíces de los cultivos con el fin de reducir insumos externos.
3. Diseñar agroecosistemas en los que las relaciones ecológicas y biológicas provean insumos de nutrientes en forma de biomasa, e incorporar en el diseño elementos que faciliten los procesos de regulación de poblaciones de plagas. Así se requerirá mucho menor cantidad de energía cultural.
 - Usar mucho más cultivos que fijen nitrógeno, abonos verdes y barbecho.
 - Aumentar el uso del control biológico mediante cultivos de cobertura o cultivos intercalados, generando hábitats para un control natural de las plagas.
 - Cultivar especies que estén adaptadas a las condiciones locales, en lugar de tratar de modificar el ambiente local según las necesidades del cultivo.
 - Incorporar otros elementos del ecosistema, tales como cortinas rompevientos y áreas no cultivadas, que permitan facilitar el manejo del hábitat y microclimas de los agroecosistemas.
 - Diseñar agroecosistemas tomando como base los ecosistemas naturales locales.
 - Maximizar el uso del desarrollo sucesional en sistemas de cultivo (por ejemplo mediante la agroforestería), para mantener una mejor capacidad de regeneración de los agroecosistemas.
 4. Desarrollar indicadores de sostenibilidad aplicados a los agroecosistemas con base en el uso de

energía, de manera que incorporen aspectos de eficiencia, productividad y regeneración.

Es muy común escuchar el argumento de que sin el uso continuo e intensivo del petróleo, la agricultura no será capaz de llenar la demanda de alimentos que se requiere para el planeta.

Este punto de vista señala el principal reto que tenemos en los próximos decenios, al mismo tiempo ignora los serios problemas generados por los métodos actuales de producción de alimentos. También ignora las alternativas prácticas y reales que existen y que se pueden usar si llevamos a cabo investigación con un enfoque de análisis de sistema para los cultivos.

El incremento acelerado en el uso de energía en la agricultura durante el siglo XX, ha cambiado radicalmente la forma de cómo hacemos agricultura. El entendimiento del factor energético como un elemento ecológico en la agricultura, así como su uso y flujo como una cualidad emergente de los agroecosistemas, nos permite tener mejores mecanismos de evaluación de las prácticas actuales en la agricultura. De este modo contribuimos, no solamente al desarrollo de prácticas sino también al desarrollo de políticas, que permitan lograr la sostenibilidad en la producción agrícola. Mientras más tiempo tardemos en desarrollar alternativas de usos de energía con base ecológica, más vulnerables serán nuestros sistemas de producción de alimentos en el futuro.

ESTUDIO DE CASO

Análisis Energético de la Producción de Fresa en Santa Cruz, California y en Nanjing, China

Como parte de un estudio comparativo de agroecosistemas de fresa, investigadores de la Universidad de California, Santa Cruz y de Nanjing, Instituto de Ciencias Ambientales en Jiangsu, China, evalúan los patrones de uso de energía y su eficiencia en sistemas convencionales y orgánicos, tanto en California como en China. El objetivo es comparar ambos sistemas, el convencional y el orgánico, desde el punto de vista energético, económico y ecológico (Gliessman *et al.* 1996, Zhengfang 1994).

Los científicos analizan los procesos de transición de un sistema convencional a uno orgánico en ambas localidades, para esto comparan técnicas de manejo e investigan las causas que explican las diferencias en las respuestas del cultivo.

Algunas de las preguntas que tratan de responder son: ¿cuál es la relación entre la producción del cultivo y la proporción del uso de energía no renovable con el uso de energía renovable? ¿cómo cambian estas proporciones durante el proceso de conversión de un sistema convencional a otro orgánico? ¿cómo pueden vincularse el análisis energético con los parámetros ecológicos y económicos en un análisis integral de la sostenibilidad del agroecosistema?.

Algunos de los datos obtenidos y utilizados durante tres años de estudio, así como su análisis ini-

cial se presentan en el Cuadro 18.4. La producción orgánica de fresas en California tiene los valores más altos de energía cultural como insumo, de ellos el 57,3 % proviene de fuentes no renovables. Entre los insumos no renovables se encuentra el uso del tractor, el plástico que cubre los surcos, las mangueras de irrigación por goteo, el uso de la electricidad para la irrigación y el material para empacar la cosecha; las formas renovables de energía usadas son el trabajo manual por el ser humano y los fertilizantes en forma de compost. El sistema convencional de producción de fresas muestra valores más altos de uso de energía; casi todo el insumo (98 %) proviene de fuentes no renovables. Entre ellos destaca el uso del tractor, especialmente para la aplicación de fertilizantes sintéticos, y varios tipos de plaguicidas, incluyendo fumigantes de suelo como el bromuro de metilo. Estos factores constituyen la mayor parte del 98 % mencionado anteriormente.

Los sistemas de producción orgánica de fresa en Nanjing, utilizan significativamente menos energía que cualquiera de los sistemas en California; es importante notar que alrededor del 97,3 % de la energía que se usa en el sistema es renovable, proveniente de composts, de biogas y otras fuentes de materia orgánica. Estos materiales contienen una alta cantidad de energía y provienen de fuentes locales. De hecho, la mayor parte de esta materia orgánica podría ser considerada como basura. El sistema convencional de producción de fresa en Nanjing también tiene una cantidad baja de energía en forma de insumo; en contraste con su contraparte en California, solamente el 43,1 % de la energía que se utiliza proviene de fuentes no renovables.

Con respecto a su eficiencia energética, todos los sistemas mostraron una menor cantidad de

energía en forma de producto cosechado, que la cantidad de energía que se requirió para esa producción. Los sistemas convencionales mostraron una relación de insumo:producto más favorable que los sistemas orgánicos; ambos sistemas en China fueron más eficientes que sus contrapartes en California. Sin embargo, desde el punto de vista de sostenibilidad, el análisis energético que realmente debe tomarse en cuenta es la cantidad de energía cosechada, comparada con la cantidad utilizada de energía de fuentes no renovables. En el sistema convencional de California, la relación no es más alta que una simple relación de insumo:producto (hay que recordar que el uso de energía renovable en este sistema es muy bajo). Si comparamos el sistema orgánico de California con el sistema convencional de Nanjing, la relación insumo:producto energético se duplica (pero de todos modos es menor que 1:1). El sistema orgánico de Nanjing, con su casi total dependencia de energía renovable, tiene una relación de producto a uso de energía no renovable mucho más favorable que cualquiera de los sistemas anteriores. El valor es impresionante, 2,8:1, demostrando que hay un nivel de sostenibilidad mucho mayor que en cualquiera de los otros sistemas estudiados.

El análisis energético de los sistemas de cultivo también tiene que tomar en cuenta la producción y el ingreso económico. El análisis energético por

CUADRO 18.4. Cuantificación de uso de energía en cuatro sistemas de producción de fresa*

	California		Nanjing	
	Orgánica	Convencional	Orgánica	Convencional
Cantidad total de insumo de energía (x10 ⁶ kcal/ha)	11,6	79,8	44,7	16,7
Insumo de energía no renovable (% del total)	57,3	98,0	2,7	43,1
Total de egreso de energía al mercado (x10 ⁶ kcal/ha)	14,1	20,7	3,4	2,9
Egreso/insumo	0,13	0,26	0,076	0,17
Egreso/insumo no renovable	0,22	0,26	2,8	0,4

* Promedio de tres años de estudio.

sí solo **no nos** dice todo lo necesario para conocer la sostenibilidad de un sistema. El sistema orgánico de California tuvo una producción promedio de 2.5 % menor que la producción en el sistema convencional en ese mismo lugar. Sin embargo, el precio del producto orgánico en el mercado hace que

esa menor producción sea bastante competitiva para generar ganancias al agricultor. En Nanjing, el sistema orgánico también le proporciona mayor ganancia al agricultor; pero esto se debe a que hay mayor producción en este sistema que en el convencional, no por el precio de un producto orgánico.

De este estudio se derivan dos conclusiones importantes. Los productores de fresa orgánica en California no deben preocuparse tanto por incrementar su producción por área, sino enfocar sus esfuerzos a la búsqueda de formas para reducir la dependencia que tienen del uso de fuentes de energía no renovables, que son costosas. Los productores de fresa orgánica en Nanjing deben tratar de mantener su sistema. El asunto más importante no es el de tener un sistema que dependa mucho menos del trabajo humano en cualquiera de estos dos lugares. En Nanjing ambos sistemas tienen un promedio de 40 % más trabajo por seres humanos que en California, y en ninguno de ambos sistemas orgánicos se usa más de un promedio del 20 % de energía en forma de trabajo humano, comparado con su contraparte del sistema convencional. Aún cuando el precio del trabajo humano puede ser un factor económico significativo, el número absoluto de horas trabajadas en los sistemas orgánicos no tiene variación prácticamente. Es obvio que los insumos que se utilizan en el sistema agrícola deben analizarse desde diversos puntos de vista. Si somos capaces de rela-



FIGURA 18.11

Producción de fresas en California y China. En California (arriba) las fresas son un cultivo de alto valor económico y de consumo intensivo de energía. En China (abajo) una cantidad significativa de la energía usada en el cultivo es de origen local y es renovable.

cionar el análisis energético de los sistemas estudiados con los análisis de nutrimentos, de población de plagas, de la calidad del suelo y otros indicadores de los componentes ecológicos de los agroecosistemas, estaremos en condiciones de en-

tender la sostenibilidad de esos sistemas. Se debe hacer investigación de esta naturaleza en cultivos que juegan un papel más importante en la alimentación de los seres humanos y que cubren áreas mayores de cultivo en el mundo.

Ideas para Meditar

1. ¿Qué diferencia hay entre el uso de energía biológico-cultural y el de energía cultural-industrial con respecto a los impactos ecológicos?
2. ¿Qué tipos de energía cultural-industrial que se requieren en la agricultura provienen de fuentes renovables?
3. ¿Cómo podríamos usar fuentes renovables de energía para reemplazar las fuentes no renovables y, al mismo tiempo, producir la cantidad de alimento requerida?
4. ¿Qué papel pueden jugar los animales para mejorar la eficiencia de la energía en fuentes con alta concentración de la misma, y la transferencia de esa energía en agroecosistemas?
5. ¿Cuál sería tu definición de uso sostenible de energía en agricultura?
6. ¿Cómo el uso del petróleo ha enmascarado los costos ambientales de la agricultura convencional?
7. ¿Cómo ha influido la filosofía de "fe en la tecnología" en el desarrollo e investigación de fuentes sostenibles de energía para la agricultura basadas en la ecología?

Lecturas Recomendadas

Fluck, R.C. (ed.) 1992. *Energy in Farm Production*. Energy in World Agriculture, Volume 6. Elsevier: Amsterdam.

Una revisión completa de los principios básicos del uso de energía en agricultura; presenta datos del uso eficiente de energía y fuentes alternas potenciales.

Odum, H.T. 1983. *Systems Ecology: An Introduction*. Wiley: New York.

Una obra básica para el estudio de sistemas con enfoque ecológico. Analiza cómo fluye la energía a través de ecosistemas naturales y cómo puede usarse este conocimiento para alcanzar la sostenibilidad en sistemas manejados por el ser humano.

Pimentel, D. (ed.) 1980. *Handbook of Energy Utilization in Agriculture*. CRC Press: Boca Ratón, FL.

Un estudio clásico sobre fuentes de energía usados en agricultura. La obra estimula el pensamiento hacia el uso eficiente de energía y su cuantificación.

Pimentel, D., and M. Pimentel. (eds.) 1997. *Food Energy and Society*. Second edition. University Press of Colorado: Niwot, CO.

La obra revisa los problemas que tiene una agricultura dependiente de energía proveniente de recursos no renovables, así como la complejidad de factores que influyen en la falta de desarrollo de fuentes alternativas de energía.

LA INTERACCIÓN ENTRE LOS AGROECOSISTEMAS Y LOS ECOSISTEMAS NATURALES

Desde los inicios de la agricultura, los agroecosistemas han desplazado y alterado los ecosistemas terrestres que ocurren naturalmente en toda la faz de la tierra. El continuo proceso de incorporar tierras a la producción agrícola ha tenido un impacto negativo y dramático en la diversidad de organismos y procesos ecológicos que componen el paisaje. Aunque otras formas de explotación humana del ambiente, tales como la urbanización y la explotación de minas han contribuido a modificaciones del hábitat a gran escala y a la pérdida de la biodiversidad, la producción agrícola incluyendo el pastoreo y la extracción de madera tiene gran responsabilidad en los cambios ambientales a nivel de la biosfera, los cuales amenazan los sistemas que sostienen la vida del planeta.

Una de las metas más importantes del desarrollo de la agricultura sostenible es revertir este legado de destrucción y negligencia. La producción agrícola puede realizarse de manera que ayude a conservar los recursos bióticos y a proteger la calidad ambiental. La agricultura sostenible por tanto, comparte con la biología de la conservación los mismos fines e intereses. Este Capítulo se refiere a la manera en que las dos pueden trabajar conjuntamente para cumplir esas metas.

La agricultura sostenible y la biología de la conservación están orientadas hacia el mantenimiento de la productividad de los ecosistemas; ambas tienen interés en preservar la biodiversidad y limitar las prácticas ambientalmente destructivas. Aunque la primera trata con sistemas manejados y la segunda con los naturales, la distinción entre las dos disciplinas se está volviendo cada vez más tenue. A causa de los profundos efectos de la actividad humana en todos los ecosistemas, no es posible seguir preservando la biodiversidad natural simplemente con la protección de los ecosistemas naturales de la influencia humana. Tal como lo han demostrado los esfuerzos por

restaurar hábitats naturales, el rescate de especies al borde de la extinción y la protección de poblaciones nativas de todo tipo, la preservación de la biodiversidad natural es una cuestión de manejo, tanto como lo es la producción agrícola.

Ambos, el manejo del agroecosistema y el manejo de la conservación provienen de un conocimiento ecológico fundamental. Todos los ecosistemas sin importar cuanta intervención humana experimenten funcionan bajo principios similares y los mismos factores determinan su sostenibilidad. El entendimiento de las interacciones suelo-planta-animal, por ejemplo, es importante para el desarrollo de los cultivos y para la restauración de ecosistemas dañados o degradados. La agroecología por lo tanto, con su fundamento en la ecología, proporciona una buena base para la combinación fructífera de la agricultura y la biología de la conservación.

EL PAISAJE AGRÍCOLA

El desarrollo agrícola dentro de un ambiente anteriormente natural, resulta en un mosaico heterogéneo de una amplia variedad de tipos de hábitat fragmentados, dispersos a lo largo y ancho del paisaje. La mayoría del terreno puede estar manejado de manera intensiva y frecuentemente perturbado para los propósitos de la producción agrícola, pero ciertas partes (humedales, corredores riparios, promontorios) pueden permanecer en una condición relativamente natural, y otras partes (bordes de campos de cultivo, áreas circundantes a construcciones, bordes de camino, franjas entre campos de cultivo y áreas naturales adyacentes) pueden ser perturbadas ocasionalmente, pero no manejadas de forma intensiva. Además, los ecosistemas naturales pueden rodear o bordear áreas en las cuales domina la producción agrícola.



FIGURA 19.1

Un paisaje agrícola diverso cerca de Nanjing, China. Interfase de ecosistemas naturales con una variedad de usos del suelo en un asentamiento agrícola.

Aunque el nivel de la influencia humana sobre la tierra varía en un continuo desde el manejo y la perturbación intensa hasta la naturaleza prístina, podemos dividirlo en tres secciones para derivar tres tipos básicos de componentes del paisaje agrícola:

1. *Áreas de producción agrícola.* Manejadas de manera intensiva y perturbadas regularmente, estas áreas están compuestas principalmente por especies de plantas domesticadas.
2. *Áreas de influencia humana reducida o moderada.* Esta categoría intermedia incluye pastizales, bosques manejados para la extracción de madera, barreras vivas y otras áreas de borde y sistemas agroforestales. Estas áreas se conforman típicamente de alguna mezcla de especies de plantas na-

tivas y no nativas, y son capaces de servir como hábitat para muchas especies animales nativas.

3. *Áreas naturales.* Estas áreas mantienen alguna semejanza con la estructura del ecosistema original y la composición de especies que se presenta naturalmente en el lugar, pueden ser de tamaño pequeño, contener algunas especies no nativas, y estar sujetas a algún grado de perturbación humana.

Estos tres componentes paisajísticos, en varios arreglos y combinaciones, forman el patrón del mosaico del paisaje agrícola típico.

Patrones del Paisaje

Dentro del mosaico del paisaje hay tres patrones comunes, reconocibles, de cómo cada uno de los tres componentes está dispuesto en relación con los otros: (1) un área natural y un área manejada para la producción agrícola, separadas por una zona de influencia humana reducida o moderada; (2) las áreas naturales forman bandas, corredores o mosaicos dentro de un área de producción agrícola; y (3) áreas de influencia humana moderada o reducida se encuentran dispersas dentro de un área de producción agrícola. Estos tres tipos, ilustrados en la Figura 19.2, se pueden disponer y combinar de muchas maneras diferentes.

Una variable importante en la composición del mosaico del paisaje agrícola es su grado de heterogeneidad o diversidad. Los paisajes son relativamente homogéneos cuando predominan áreas de producción agrícola, que no son interrumpidas por cuadros o bandas de los otros dos tipos de componentes del paisaje. En contraste, los paisajes heterogéneos tienen gran abundancia de áreas no cultivadas o con vegetación original.

La heterogeneidad del paisaje agrícola varía mucho de región a región. En algunas partes del mundo (ejemplo, el medio oeste de los Estados Unidos), el uso intensivo de agroquímicos, mecanización, líneas genéticas estrechas e irrigación en grandes áreas de cultivo, ha producido un paisaje relativamente homogéneo. En estas regiones, el paisaje agrícola se compone principalmente de grandes extensiones de un solo cultivo. En otras áreas (ejemplo, la provincia de Jiangsu del Yangtze en China) el uso de prácticas

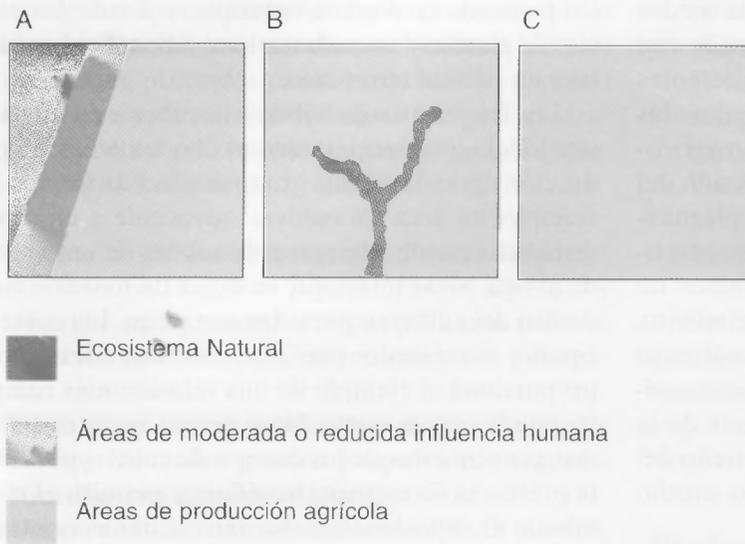


FIGURA 19.2
Ejemplos de tres patrones comunes en el arreglo de los componentes del paisaje agrícola. Un ecosistema natural y un agroecosistema pueden estar separados por un área de influencia humana intermedia (a); un ecosistema natural puede formar un corredor, banda o fragmento dentro de un agroecosistema (b); áreas de manejo humano menos intenso pueden estar dispersas dentro de un área de producción agrícola más grande (c).

agrícolas tradicionales, con uso mínimo de insumos industriales ha provocado un paisaje variado, altamente heterogéneo, posiblemente aún más heterogéneo de lo que podría ser naturalmente.

A causa de la composición de su mosaico, el típico paisaje agrícola es un ambiente ecológicamente fragmentado. Cada cuadro del paisaje es un fragmento aislado de otros cuadros similares por algún otro tipo de comunidad disímil ecológicamente hablando. Esta fragmentación puede tener efectos negativos para poblaciones restringidas a un tipo particular de hábitat por una parte, y por la otra, un paisaje heterogéneo fragmentado tiene una alta diversidad gamma. Como veremos en la siguiente sección, el manejo eficaz del paisaje implica el mejoramiento de la diversidad gamma y el aprovechamiento de sus beneficios, mientras se mitigan, al mismo tiempo, las consecuencias negativas de la fragmentación del hábitat.

El Análisis del Paisaje

En el nivel del paisaje, el movimiento de organismos y sustancias entre fragmentos del hábitat, se convierte en un factor crítico en el mantenimiento de los procesos ecológicos en su totalidad. También es importante la interacción de organismos y procesos físicos localizados en diferentes parcelas de hábitat. Lo que suceda en un área del paisaje puede tener un impacto en otras. El estudio de estos factores y cómo son conformados por la organización espacial del paisaje se conoce como **ecología del paisaje**. La ecología

del paisaje proporciona una buena base para el manejo del paisaje agrícola, porque nos ayuda a entender cómo se forman e interactúan las diferentes partes del mosaico paisajístico (Barret *et al.* 1990).

Dos herramientas importantes en la ecología del paisaje son la fotografía aérea y el análisis de los sistemas de información geográfica (SIG). Con el uso de estas herramientas, los patrones actuales del paisaje se pueden contrastar con aquellos observados en el pasado. Los cambios ocurridos se pueden correlacionar entonces con los datos de los sistemas de producción, para entender el papel de los agroecosistemas en el mantenimiento de la estabilidad y sostenibilidad de los sistemas del paisaje. Esto último provee las bases para el diseño de esquemas de manejo que consideren todos los elementos del paisaje (Lowrence *et al.* 1986).

Cualquier forma de datos históricos sobre los patrones del paisaje puede ser útil en el análisis del paisaje agrícola. Los datos censales, como los del Censo Agrícola de los Estados Unidos, pueden ser muy importantes en la determinación de los tipos de cultivo que se han producido en una región y en donde se cultivaron. Estos datos ofrecen valores cuantificables si se combinan con fotografías aéreas, otorgando al analista la posibilidad de determinar el número de elementos del paisaje presentes en diferentes épocas (ejemplo, campos de cultivo, pastizales, corredores riparios, relictos de bosque). Cuando estos datos se someten al análisis SIG, se convierten en una forma dinámica de visualizar los patrones y relaciones de la estructura del paisaje en el tiempo.

El conocimiento de las prácticas agrícolas usadas en el pasado en un paisaje particular, combinado con el conocimiento de cómo interactúan los diferentes componentes de éste, hace posible entender cómo las prácticas agrícolas impactan los elementos no agrícolas de un paisaje y viceversa. Las tasas de erosión del suelo, clases de fertilizantes, aplicaciones de plaguicidas, riego, diversidad y tipos de cultivo y otras prácticas y procesos, se pueden entender en términos de patrones del paisaje. Basados en este conocimiento, se pueden hacer recomendaciones para el cambio ya sea de los patrones de cultivo o de las prácticas agrícolas, y al mismo tiempo, se puede ir más allá de la unidad de producción en las decisiones de diseño del agroecosistema, en un contexto paisajístico mucho más amplio.

MANEJO A NIVEL DE PAISAJE

Cuando el manejo del agroecosistema se desarrolla a nivel del paisaje agrícola, el antagonismo que existe a menudo entre los intereses de los ecosistemas naturales y los de los sistemas de producción manejados, se puede reemplazar por una relación de beneficio mutuo. Es factible que fragmentos de ecosistemas naturales y seminaturales incluidos en el paisaje, se conviertan en recursos para los agroecosistemas, y éstos puedan empezar a asumir una posición más positiva que negativa en la preservación de la integridad de los ecosistemas naturales.

El concepto de manejo a nivel del paisaje no quiere decir necesariamente, que haya un manejo coordinado entre los diferentes usuarios de la tierra en un área agrícola (diferentes tipos de productores, oficinas gubernamentales, intereses de conservación, etc.). Su esencia es la inclusión de los ecosistemas naturales y la biodiversidad local en las decisiones de planeación y manejo. De esta forma, el manejo a nivel del paisaje lo puede realizar un productor individual, que tiene control directo sobre sólo una pequeña parte del paisaje agrícola de una región.

El principio que guía el manejo a nivel del paisaje, es la diversificación del paisaje agrícola mediante el incremento de la densidad, tamaño, abundancia y variedad de fragmentos de hábitat sin cultivar. Estos relictos pueden variar en su nivel de perturbación y "naturalidad" lo que tienen en común es la habilidad para desempeñarse como sitios donde pueden darse

los procesos ecológicos naturales, y donde las especies de plantas y animales nativos o benéficas encuentren un hábitat apropiado.

Los fragmentos de hábitat sin cultivar en un paisaje agrícola, pueden interactuar con las áreas de producción agrícola en una gran variedad de formas. Por ejemplo, un área sin cultivar, adyacente a un campo de cultivo, puede albergar poblaciones de una especie de avispa parasitoide, que es capaz de moverse hacia dentro del cultivo y parasitar una plaga. Un corredor ripario, compuesto por especies vegetales nativas proporciona el ejemplo de una relación más compleja: puede actuar como filtro de nutrientes lixiviados, provenientes de los campos de cultivo, promover la presencia de especies benéficas y permitir el movimiento de especies animales nativas, dentro y a través de los componentes agrícolas del paisaje.

Como se puede ver en estos ejemplos, la diversificación en el nivel del paisaje ofrece beneficios tanto para las especies nativas como para los agroecosistemas. Cuando la diversificación se planea y maneja cuidadosamente, estos beneficios se pueden maximizar y así, minimizar los posibles efectos negativos. El manejo eficiente a nivel del paisaje es entonces una parte importante para lograr la sostenibilidad.

Diversificación en la Unidad de Producción

El primer paso para obtener un paisaje agrícola más diverso en una parcela individual, es reducir o eliminar cualquier insumo agrícola que tenga un efecto negativo sobre los ecosistemas naturales y el funcionamiento ecológico del agroecosistema. De estos insumos, los plaguicidas son los más obvios, pero los fertilizantes inorgánicos y el riego también pueden tener efectos negativos. Además, varias prácticas agrícolas permiten la interferencia con la diversificación del paisaje: éstas incluyen la labranza frecuente del suelo, permanencia de suelos descubiertos por largos períodos, plantación de monocultivos a gran escala y la corta y aspersión en zanjas y bordes del camino.

El siguiente paso es favorecer y mantener la presencia de especies nativas en la granja, lo que implica principalmente la protección y establecimiento de hábitats apropiados (Office of Technology Assessment 1985). Estos hábitats pueden estar dentro de los campos de cultivo, entre los cultivos, a lo largo de caminos, en zanjas, en los límites de la propiedad o en

los márgenes que separan las áreas habitadas de las cultivadas. Los hábitats pueden ser bandas o bloques permanentes, plantados para diversificar las especies perennes no cultivadas, o mosaicos temporales dentro de los cultivos. Los métodos para crear tales hábitats incluyen lo siguiente:

- Plantar un cultivo de cobertura durante los meses de invierno. El cultivo podría proveer alimento y albergue en momentos críticos para una serie de especies animales, particularmente aves que anidan en el suelo.
- Dejar sin cosechar bandas de cultivos como maíz o trigo, las cuales pueden proporcionar recursos para especies animales nativas.
- Donde se hace necesario el control de la erosión, plantar pasto en los cauces de agua para incrementar la diversidad y lograr metas importantes en la protección ambiental.
- En lomeríos con terrazas, plantar pastos o arbustos perennes en las paredes que separan las terrazas.
- Plantar especies perennes en tierras marginales o susceptibles de erosión, o restaurar estas tierras a un estado más natural, al permitir la sucesión natural de especies nativas.
- Restaurar como humedales naturales, los sitios de

la unidad de producción pobremente drenados o que son humedales semipermanentes.

- Retener árboles nativos dentro y alrededor de los campos de cultivo para que las aves nativas puedan anidar, cazar y posarse.
- Proveer perchas artificiales para las aves rapaces nativas y pajareras para otras especies de aves potencialmente benéficas.

En un paisaje agrícola muy modificado, donde queda muy poco, si es que aún queda, del hábitat natural, todos estos tipos de medidas pueden ser muy importantes para restaurar en algún grado la biodiversidad del paisaje.

Bordes y Orillas en las Granjas

En donde existen ecosistemas naturales no cultivados, relativamente extensos, dentro y alrededor del paisaje agrícola, la frontera compartida o interfase entre estas áreas y aquellas manejadas para la producción agrícola, tienen un significado ecológico relevante. Esto es particularmente cierto en regiones donde existía una considerable variabilidad topográfica, geológica y microclimática, antes de la conversión a la agricultura. Dependiendo de la historia de manejo, estos bordes y orillas pueden ser abruptos y

ESTUDIO DE CASO

Diversidad del Paisaje en Tlaxcala, México

En el Capítulo 8 analizamos cómo las terrazas y *cajetes* construidos en las laderas de Tlaxcala, preservan la capa arable y manejan con efectividad el agua del suelo. El sistema de Tlaxcala también tiene otros componentes importantes, uno de los cuales es el alto grado de diversidad del paisaje (Mountjoy y Gliessman, 1988). Esta diversidad se logra al mantener gran cantidad de borde permanente entre terrazas cultivadas cubiertas con vegetación natural.

Las áreas de borde ocupan las orillas de las terrazas arriba y abajo de los canales. Están plantadas con una mezcla de especies perennes, árboles y arvenses muy diversas que se obtuvieron al permi-

tir que se diera la sucesión natural. En los bordes, las plantas ayudan al ciclo de nutrimentos, previenen la erosión y proporcionan un hábitat para organismos benéficos. Los parientes silvestres de las plantas cultivadas prosperan a menudo también en las áreas de borde, ofreciendo una fuente de flujo genético que puede ayudar a mantener la dureza y resistencia de los cultivos.

Debido a que las terrazas son largas y estrechas, ninguna planta cultivada está a más de 6,5 m de un borde. Cerca del 30 % del paisaje agrícola está compuesto de vegetación de borde, mientras que el 60 % o menos está cultivado y el 10 % restante se encuentra en descanso. Por todos estos conceptos, estos sistemas de ladera son muy diversos y diseñados para aprovechar todas las ventajas que puede ofrecer la diversidad a nivel del paisaje.



FIGURA 19.3

Bordes con árboles y especies perennes nativas a lo largo de terrazas cultivadas, Tlaxcala, México. Bandas de vegetación natural, son componentes prominentes y ecológicamente importantes del paisaje agrícola de esta región de colinas. Nótese los animales pastoreando en las orillas y los tallos de maíz apilados para futuro forraje.

bien definidos, o amplios y mal definidos. Cuando hay una transición gradual entre un área de cultivo y la vegetación natural (como sucede por ejemplo entre una plantación de cacao con sombra y la selva circundante), se crea un **ecotono**. Tales zonas transicionales son reconocidas a menudo como hábitats distintivos en sí mismos, capaces de albergar mezclas únicas de especies. En muchas ocasiones, estas zonas se componen de especies provenientes de la sucesión, tanto de los ecosistemas naturales como de los agroecosistemas manipulados.

Creando Beneficios para el Agroecosistema

Los bordes que son ecotonales en la naturaleza, pueden tener funciones importantes en un paisaje agrícola, aunque sean relativamente angostos. Dado que las condiciones ambientales existentes en el borde son transicionales, entre el hábitat agrícola y el hábitat natural, las especies de ambos hábitats se pueden presentar ahí, junto con otras especies que prefieren las condiciones intermedias. Muy frecuentemente, la variedad y densidad de vida es más grande en el hábitat

del borde o ecotono, fenómeno que se ha denominado **efecto de borde**. El efecto de borde está influenciado por la cantidad de borde disponible, largo, ancho y el grado de contraste entre hábitats adyacentes, siendo todos estos factores determinantes.

Los beneficios del hábitat de borde para los sistemas de cultivo se conocen mejor ahora. En una revisión minuciosa del tema, a propósito de la influencia de hábitats adyacentes, sobre las poblaciones de insectos en campos de cultivo, Altieri (1994b) sugiere que los bordes son hábitats importantes para la protección y propagación de una gran cantidad de agentes de control biológico natural de organismos plagas. Algunos organismos benéficos no son atraídos o no son capaces de sobrevivir por mucho tiempo en el ambiente alterado de los campos de cultivo,

especialmente aquellos donde se aplican plaguicidas; en cambio, prefieren estar moviéndose del borde a los cultivos, usando estos últimos principalmente para alimentarse o depositar sus huevos. Otros organismos benéficos dependen de hospedantes alternos en el sistema de borde, para sobrevivir en la temporada en que los campos agrícolas no tienen poblaciones de su hospedante primario, como en la estación seca, o cuando el cultivo no está presente. A medida que aprendemos más sobre las condiciones necesarias en las áreas de borde, para asegurar poblaciones de organismos benéficos diversas y eficaces, el manejo de estas áreas transicionales puede convertirse en parte del proceso de manejo del paisaje.

El manejo de los bordes dependerá en parte de la determinación de una relación espacial apropiada con las áreas cultivadas. ¿Cuál es la proporción ideal del área de hábitat de borde con respecto al área de cultivo? ¿Qué tan cerca deben estar los cultivos del área de borde para aprovechar los organismos benéficos que dependen de este hábitat? Tales problemas deberán abordarse para optimizar los beneficios para el agroecosistema y mejorar la biodiversidad regional.



FIGURA 19.4

Hábitat de borde con vegetación de crecimiento secundario en la Finca Loma Linda, Coto Brus, Costa Rica. Una vegetación diversa y baja en el borde del bosque, puede servir como hábitat para organismos benéficos, los que una vez establecidos ahí se pueden mover hacia la zona de cultivos.

Protegiendo los Ecosistemas Naturales Contiguos

Si cambiásemos nuestra perspectiva de la salud de los ecosistemas naturales, al otro lado del límite de los campos de cultivo, el borde se podría ver como una **zona de amortiguamiento**, que protege a los sistemas naturales de los impactos negativos de la agricultura, forestería o pastoreo. Como amortiguador, el borde modifica el flujo del viento, los niveles de humedad, la temperatura y la radiación solar característica del campo de cultivo, de tal forma que estas condiciones ambientales no ejerzan un impacto muy grande sobre los ecosistemas naturales contiguos (Ranney *et al.* 1981). Esta modificación es especialmente importante para las especies que viven bajo el dosel de la vegetación forestal; un borde abrupto podría permitir la penetración del viento, calor y luz más intensa en el bosque, lo que alteraría la composición de especies.

Las zonas de amortiguamiento tienen también otros papeles importantes. Por ejemplo, pueden prevenir el desplazamiento del fuego del hábitat abierto, de los sistemas agrícolas a los ecosistemas naturales. Esta protección tiene especial importancia en áreas donde se usa el fuego para quemar los restos de la roza y tumba en las prácticas de la agricultura transhumante.

Un estudio en la costa central de California demostró cómo las zonas de amortiguamiento pueden

mitigar eficazmente los impactos de la agricultura en el ambiente natural vecino (Brown 1992). En el sitio de estudio y alrededor de él, suelos con lomas muy expuestas a la erosión y lixiviación son llevados hacia los humedales estuarinos pendiente abajo. La fresa es el cultivo típico en el borde de las tierras húmedas. En años lluviosos, las tasas de erosión exceden las 150 t/ha. Además, los nitratos se lavan hacia el estuario a causa de la lluvia y el riego, y los fosfatos y residuos de plaguicidas adheridos a las partículas erosionadas del suelo, son transportados también hacia el estuario, contribuyendo a la degradación del ecosistema de humedales (Soil

Conservation Service 1984). En un intento por prevenir estos impactos negativos, se plantó una zona de amortiguamiento entre los campos de fresa cultivados intensivamente y el estuario (Figura 19.5). Debido a que pastos y arbustos costeros ocuparon originalmente los sitios de cultivo, se plantaron pastos perennes nativos en bandas tupidas, variando de 20 a 50 m de ancho. Una vez establecida, la cobertura del pasto atrapó sedimentos y tomó nutrientes solubles, limitando tanto la erosión como el flujo de nitratos, fosfatos y plaguicidas hacia el estuario. La zona de amortiguamiento también sirvió como reservorio potencial de insectos benéficos para las áreas cultivadas.

Las zonas de amortiguamiento se han convertido en componentes muy importantes de proyectos de desarrollo basados en la ecología (ecodesarrollo) en muchas partes del mundo rural (Gregg 1991). En regiones donde los bosques son invadidos por los sistemas de cultivo y por ganaderos que reemplazan los ecosistemas naturales por actividades agrícolas, las zonas de amortiguamiento pueden protegerlos de incursiones ulteriores y aún más, proporcionar un espacio donde puedan registrarse actividades humanas. Las actividades tradicionales de uso de la tierra como forestería no extractiva, cultivo bajo sombra, agroforestería y recolección de plantas nativas y productos animales, son permitidos en la zona de amortigua-



miento, mientras se mantenga la estructura del bosque en esta zona y se proteja el bosque adyacente. En una situación ideal, el ecosistema forestal se preserva, la actividad económica se mantiene limitada y las actividades agrícolas intensivas se llevan a cabo en las zonas adyacentes deforestadas. El éxito de tales programas se ha visto limitado debido a una variedad de razones sociales, económicas y políticas (Alcorn 1991), pero el concepto mantiene la promesa de ser una forma importante de integrar las metas de la agricultura sostenible y la conservación de la biodiversidad.

La Ecología de la Fragmentación

La fragmentación del paisaje agrícola tiene una profunda influencia en los procesos ecológicos que ocurren a lo largo del paisaje en general. Y aunque los fragmentos de hábitats similares se aíslan unos de otros, la diversidad gamma es potencialmente alta. En tal contexto, el tamaño y forma de los fragmentos y la distancia entre ellos, son factores importantes que determinan la biodiversidad del paisaje a largo plazo.

Cuando las tierras agrícolas altamente modificadas, separan fragmentos de ecosistemas naturales, los fragmentos son ecológicamente análogos a islas. Si-



FIGURA 19.5
Banda de amortiguamiento con pasto nativo perenne entre plantaciones de fresa y la zona de pantanos de un estuario, Elkhorn Slough, California, EE.UU. Cuando se cultivan fresas en el borde del estuario (arriba a la izquierda), éste es sometido al impacto de la erosión y lavado de los suelos. El amortiguamiento del pasto perenne (izquierda) mitiga estos impactos, restaurando al mismo tiempo la diversidad de especies en la región.

guiendo la teoría de la biogeografía de las islas, presentada en el Capítulo 16, podemos suponer que los ecosistemas naturales y los agroecosistemas pueden crear barreras entre ellos, para el movimiento de diferentes especies animales y vegetales. Una población de una especie particular que vive en un fragmento, puede estar aislada de otras poblaciones, a menos que se de un intercambio frecuente de individuos entre fragmentos, cada subpoblación puede estar sujeta ya sea al aislamiento genético o a su extinción.

Debido a que los fragmentos de ecosistemas naturales proveen refugios para organismos benéficos para la agricultura y también otros servicios ambientales, es provechoso determinar la densidad óptima, abundancia y configuración de los fragmentos de ecosistemas naturales, en relación con las áreas de producción agrícola. De esta forma, pueden ser necesarios corredores que conecten fragmentos de hábitat, para facilitar el movimiento de organismos benéficos en el paisaje. Cierta anchura para el borde puede proporcionar el efecto de borde óptimo, sin crear problemas de plagas a los ecosistemas naturales y agrícolas. Los promotores del manejo integrado de plagas aducen a menudo, que el éxito sin el uso de plaguicidas requerirá de programas de manejo regionales a nivel de paisaje, que aprovechen los mecanismos de aislamiento y faciliten un ambiente fragmentado (Settle *et al.* 1996). Para resolver estos problemas se requieren ecólogos para aplicar su conocimiento en ecosistemas naturales (Kareiva 1996).

EL PAPEL DE LA AGRICULTURA EN LA PROTECCIÓN DE LA BIODIVERSIDAD REGIONAL Y GLOBAL

El desarrollo agrícola ha cambiado fundamentalmente la relación entre la cultura humana y el ambiente natural. No hace mucho tiempo en la historia humana, cuando toda la agricultura era tradicional y en pequeña escala, los agroecosistemas se hallaban diseminados en pequeños fragmentos en todo el paisaje natural. Los hábitats manejados mantenían la integridad de los ecosistemas naturales mientras diversificaban el paisaje. Hoy, en contraste, predomina el uso agrícola de la tierra, siendo ahora los hábitats naturales los fragmentos dispersos.

Como consecuencia, la mayor parte de las áreas terrestres del planeta están cubiertas por paisajes culturales más que naturales. De acuerdo con algunas

estimaciones, el 95 % del ambiente terrestre del mundo está urbanizado, manejado o utilizado de alguna forma en agricultura, ganadería o forestería (Pimentel *et al.* 1992). Solamente el 3,2 % de la superficie terrestre de la tierra son áreas protegidas o reservas.

En el planeta Tierra con un paisaje cultural, los esfuerzos para preservar la biodiversidad remanente, no pueden seguir enfocados solamente a las pequeñas áreas de tierra que aún permanecen silvestres. Las tierras manejadas, particularmente las agrícolas, tienen un enorme potencial no utilizado para apoyar la diversidad de especies nativas y contribuir de esta manera, a la conservación de la biodiversidad global.

Potencialmente, con algún grado de manejo, se podría ubicar un número mayor de especies de plantas y animales. El número por unidad de área podría ser pequeño, pero el número total será eventualmente alto, porque estamos hablando de una gran cantidad de superficie terrestre. Si los agroecosistemas se manejan y diseñan de manera que sean más amigables a las especies nativas, los paisajes en los que ellos forman la mayor parte, podrán albergar mayor diversidad de organismos. Los vertebrados podrían disponer de hábitats más grandes, con mejores recursos alimenticios y con corredores para su desplazamiento. Las plantas nativas pueden tener hábitats más adecuados a sus necesidades y menores barreras para su dispersión. Los pequeños organismos, como los insectos y microorganismos del subsuelo, pueden reproducirse en condiciones menos adversas y por lo tanto, beneficiar a otras especies, ya que ellos son elementos importantes en la estructura y funcionamiento del ecosistema.

En pocas palabras, manejando los paisajes agrícolas, desde el punto de vista de la conservación de la

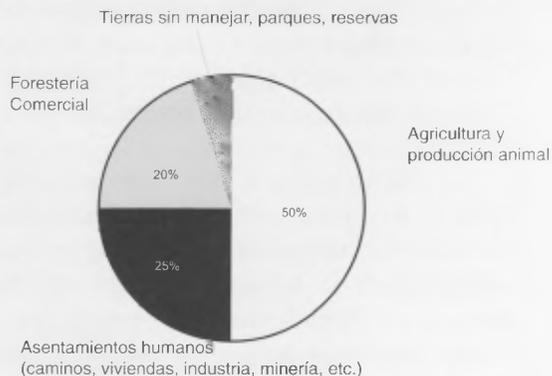


FIGURA 19.6
 Uso del suelo en el mundo.
 Fuente: Pimentel et al. (1992).

biodiversidad, así como de la producción, todos los organismos se pueden beneficiar a largo plazo, incluyendo a los humanos. Aprender cómo manejar el paisaje de esta forma requerirá la colaboración entre la biología de la conservación y la agricultura, así como de nuevos senderos en la investigación. Algunos ejemplos de las investigaciones necesarias son:

- Determinar el diseño y manejo de los agroecosistemas, de tal manera que proporcionen hábitats para otras especies diferentes a las agrícolas.
- Realizar estudios de conservación en regiones agrícolas, de manera que se puedan realizar proyectos a mayor escala, relacionando más recursos y abarcando áreas más grandes.
- Hacer de la agroecología el puente entre la conservación y el uso del suelo, para manejar la base de recursos naturales del cual dependen plantas, animales y humanos de una manera sostenible.
- Desarrollar más enfoques interdisciplinarios en la investigación y en la solución de los problemas.

Sin embargo, el gran potencial de la unión de agroecosistemas y ecosistemas naturales, se puede lo-

grar sólo realizando cambios fundamentales en la naturaleza misma de la agricultura. El punto de partida es que la agricultura debe adoptar prácticas de manejo ecológicamente sanas, que incluyen tanto controles biológicos y manejo integrado de plagas como el reemplazo de plaguicidas sintéticos y fertilizantes, así como de otros productos químicos. Sólo sobre esa base podemos alcanzar el objetivo de una biosfera sostenible.

Ideas para Meditar

1. ¿Cuáles son algunas de las posibles formas en las que los organismos típicos de los ecosistemas naturales pueden contribuir a la sostenibilidad del agroecosistema?
2. ¿Cuáles son los principales cambios que deben darse en la forma en que actualmente se manejan los agroecosistemas convencionales, de manera que puedan contribuir a la conservación de la biodiversidad, así como satisfacer las necesidades de producción alimentaria?

TEMA ESPECIAL

La Iniciativa de la Biosfera Sostenible

En 1988, la Sociedad Americana de Ecología inició esfuerzos para definir las prioridades de investigación en ecología para el final del siglo XX. Este esfuerzo se convirtió en la Iniciativa de la Biosfera Sostenible (IBS), publicada como un informe especial en la revista científica *Ecology* en 1991 (Lubchenco *et al.* 1991). La IBS describe "la función que tiene la ciencia ecológica en el manejo adecuado de los recursos del planeta y en el mantenimiento del sistema que sostiene la vida en la Tierra", y define "una agenda de investigación crítica" para cumplir ese papel.

La IBS identifica ecosistemas que deben de estudiarse urgentemente por su vulnerabilidad y potencial de degradación. También señala la necesidad de investigación básica para fortalecer nuestro entendimiento de los procesos ecológicos fundamentales, observando tal conocimiento como las bases para el diseño de estrategias que mantengan los ecosistemas de la Tierra.

Significativamente, la IBS no restringe su enfoque a los ecosistemas naturales, sino que concibe a los ecosistemas manejados (incluyendo los agroecosistemas) como parte integral de la biosfera, con un papel muy importante en la preservación de la diversidad global. Además, al reconocer la naturaleza compleja de los problemas ambientales, la IBS hace un llamado a los ecólogos, para que formen alianzas con investigadores de otras disciplinas, tanto de las ciencias naturales como de las sociales.

La IBS, por lo tanto, representa una ruptura de la barrera que había separado la investigación agrícola y la agroecología de la investigación ecológica. Los ecólogos ahora reconocen la importancia de la investigación de la ecología de sistemas altamente modificados, en los cuales los humanos juegan el papel principal.

Al mismo tiempo (como se ha señalado en este Capítulo), los investigadores en agroecología están haciendo gran énfasis en la función que los agroecosistemas tienen de preservar la integridad de los ecosistemas naturales y la biodiversidad global. El objetivo final de ambas disciplinas es básicamente el mismo: mantener funcionando a la biosfera como un todo.

3. ¿Por qué la biodiversidad de los organismos más pequeños y menos obvios de los ecosistemas, como los insectos y los hongos, es potencialmente mayor que la de organismos mayores y más visibles como pájaros y mamíferos?
4. ¿Por qué los sistemas productivos de pequeña escala de los productores tradicionales, tienen mayor capacidad para conservar la biodiversidad que los sistemas convencionales a gran escala?
5. ¿Qué tipo de criterios deberían usarse para determinar cuáles especies, en el paisaje agrícola, son más importantes para conservar y mejorar?
6. ¿Por qué la perspectiva del paisaje es importante en el manejo de la agricultura sostenible?

Lecturas Recomendadas

Antehucci, J.C., K. Brown, P.L. Croswell, y M.J. Kevany. 1991. *Geographic Information Systems: A guide to the Technology*. Reinhold: New York.

Presenta una introducción completa del uso del SIG para el manejo de datos espaciales y el análisis de sistemas.

Forman, R.T.T. y M. Gordon. 1986. *Landscape Ecology*. John Wiley and Sons: New York.

Este libro provee un marco para el análisis de patrones espaciales en el paisaje, su desarrollo y el papel de las perturbaciones y el impacto humano en su mantenimiento y dinámica.

Gholz, H. L. (ed.) 1987. *Agroforestry: Realities, Possibilities, and Potentials*. M. Nijhoff: Dordrecht, Holanda.

Una revisión cuidadosa de la agroforestería como una manera de combinar la producción agrícola con la protección ambiental.

Hudson, W.E. (ed.) 1991. *Landscape Linkages and Biodiversity*. Island Press: Washington, D.C.

Importante colección de trabajos sobre cómo el manejo a nivel del paisaje puede ser útil para el mejoramiento de la biodiversidad global.

Leopold, A. 1933. *Game Management*. Scribner: New York.

Texto clásico sobre la importancia de la función que tienen los efectos de borde, en el mantenimiento de la

abundancia de ciertas especies de fauna silvestre en un paisaje heterogéneo.

Meffe, G.K. y C.R. Carroll. 1994. *Principles of Conservation Biology*. Sinauer: Sunderland, MA.

Tratamiento objetivo de la disciplina de la biología de la conservación, combinando teoría y práctica.

Oldfield, M.L. y J.B. Alcorn. 1991. *Biodiversity: Culture, Conservation and Ecodevelopment*. Westview Press: Boulder, CO.

Un conjunto de enfoques desafiantes sobre la combinación de la conservación de recursos biológicos con el desarrollo rural, usando como base los sistemas de manejo tradicional de los recursos.

Reaka-Kudla, D., E. Wilson, y E.O. Wilson. 1996. *Biodiversity II: Understanding and Protecting Our Biological Resources*. Joseph Henry Press.

Llamado urgente para aplicar lo que sabemos sobre cuantificar, entender y proteger la biodiversidad.

Svstavava, J.P., M.J.H. Smith, y D.A. Forno (eds). 1996. *Biodiversity and Agricultural Intensification: Partners for Development and Conservation*. Environmentally Sustainable Development Studies and Monograph Series No. 11, The World Bank: Washington, D.C.

Panorama informativo de la búsqueda de coincidencias entre ambientalistas y desarrollo comunitario, sobre cómo armonizar el desarrollo agrícola con la necesidad de salvaguardar los hábitats naturales y la integridad de los ecosistemas.

Sarro, R.C. y D.W. Johnston (eds.), 1996. *Biodiversity in Managed Landscapes: Theory and Practice*. Oxford University Press: New York.

Revisión actual sobre los fundamentos ecológicos para el uso de paisajes manejados en el mejoramiento y protección de la biodiversidad.

Western, D. y M. C. Pearl. (eds.) 1989. *Conservation for the Twenty-first Century*. Oxford University Press: New York.

Evaluación crítica de las tendencias futuras en la integración de ecosistemas naturales y manejados, dentro del proceso de manejo, protección y conservación de la biodiversidad.

SECCIÓN IV

HACIENDO LA TRANSICIÓN A SOSTENIBILIDAD

El concepto de sostenibilidad ha sido el contexto que respalda casi todos los temas tópicos incluidos en el libro. Esta Sección IV, la última, hace del concepto de sostenibilidad el tema de análisis. El Capítulo 20 propone un marco de referencia para establecer los parámetros de sostenibilidad, señala indicadores que pueden evaluar si estamos avanzando en la dirección correcta, y establece criterios para determinar la investigación necesaria para alcanzar la sostenibilidad

en la agricultura. El capítulo 21 amplía la agenda de sostenibilidad, incluyendo el sistema completo de alimentación; esto significa integrar la sociedad humana con el conocimiento de sostenibilidad ecológica, lo cual nos lleva de nuevo al entendimiento de agroecosistemas que, después de todo, son el producto de la coevolución entre culturas y sus ambientes. En este balance entre necesidades sociales y salud ecológica yace la verdadera sostenibilidad.



Paisaje agrícola en las montañas al norte de Quito, Ecuador. Pueden observarse muchos de los componentes de sostenibilidad, incluyendo rotación de cultivos, técnicas de manejo de suelos, diversidad dentro y fuera de los campos de cultivo y una distribución equitativa del suelo, agua y otros recursos locales.

ALCANZANDO LA SOSTENIBILIDAD

¿ Qué es un agroecosistema sostenible? Esta pregunta se ha contestado ya en forma abstracta: hemos descrito un agroecosistema sostenible como aquel que mantiene el recurso base del cual depende, se apoya en un mínimo de insumos artificiales externos al sistema de producción, maneja las plagas y enfermedades mediante mecanismos internos de regulación, y es capaz de recuperarse de las perturbaciones ocasionadas por las prácticas de cultivo y la cosecha.

Sin embargo, es un problema distinto señalar un agroecosistema en la realidad, identificar si es sostenible o no y determinar por qué; o especificar exactamente cómo construir un sistema sostenible en una biorregión particular. La generación del conocimiento especializado para hacerlo es una de las principales tareas que enfrenta la ciencia de la agroecología hoy, y es la materia a la cual está dedicado este Capítulo.

La sostenibilidad es en última instancia una prueba de tiempo: un agroecosistema que se ha mantenido productivo por un largo período de tiempo, sin degradar su base de recursos—ya sea localmente o hacia afuera del sistema— se puede decir que es sostenible. Pero, ¿Qué constituye “un largo período de tiempo”? ¿Cómo se determina si se ha ocasionado la degradación de los recursos? ¿Y cómo se puede diseñar un sistema sostenible cuando la prueba de su sostenibilidad se encuentra siempre en el futuro?

A pesar de estos desafíos, necesitamos determinar lo que ocasiona la sostenibilidad. En pocas palabras, la tarea es identificar parámetros de sostenibilidad — características específicas de los agroecosistemas que juegan un papel clave en su función— y determinar en qué nivel o condición se deben mantener estos parámetros para que se dé la función sostenible. Mediante este proceso, podemos identificar lo que llamaremos indicadores de sostenibilidad —condicio-

nes específicas del agroecosistema que son necesarias para la sostenibilidad —e indicativas de ella. Con tal conocimiento, será posible predecir si un agroecosistema en particular se puede sostener en el largo plazo y, diseñar agroecosistemas con una mejor oportunidad de probar que son sostenibles.

APRENDIENDO DE LOS SISTEMAS SOSTENIBLES EXISTENTES

El proceso de identificar los elementos de la sostenibilidad comienza con dos clases de sistemas existentes: los ecosistemas naturales y los agroecosistemas tradicionales. Ambos han resistido la prueba del tiempo en términos de mantener la productividad en períodos largos, y cada uno ofrece un tipo diferente de conocimiento básico. Los ecosistemas naturales proveen un punto de referencia importante para el entendimiento de las bases ecológicas de la sostenibilidad. Los agroecosistemas tradicionales ofrecen abundantes ejemplos de prácticas agrícolas realmente sostenibles, así como la percepción de que los sistemas sociales, culturales, políticos y económicos, encajan en la ecuación de sostenibilidad. Basado en el conocimiento obtenido de estos sistemas, la investigación agroecológica puede desarrollar principios, prácticas y diseños que se pueden aplicar en la conversión de agroecosistemas no sostenibles, a los de tipo sostenible.

Los Ecosistemas Naturales como Puntos de Referencia

Como se discutió en el Capítulo 2, los ecosistemas naturales y los agroecosistemas convencionales son muy diferentes. Los agroecosistemas convencionales generalmente son más productivos pero menos diversos que los sistemas naturales y, a diferencia de los



sistemas naturales, están lejos de poder autosostenerse. Su productividad se puede mantener solamente adicionando grandes cantidades de insumos en energía y materiales, provenientes de fuentes humanas externas; de otra forma, estos sistemas se degradan rápidamente a un nivel mucho menos productivo. En todos los aspectos, estos dos tipos de sistemas son como extremos opuestos dentro de un espectro.

La clave para la sostenibilidad es encontrar una solución de compromiso entre los dos —un sistema que modele la estructura y función de los ecosistemas naturales— pero que rinda un producto para el uso humano. Tal sistema es manipulado en un alto grado por humanos, para fines humanos y por lo tanto, no es autosostenible, sino que se apoya en procesos naturales para el mantenimiento de su productividad. Su semejanza con los sistemas naturales permite al sistema sostener a largo plazo la apropiación humana de su biomasa, sin grandes insumos de energía industrial cultural y sin efectos detrimentales en el ambiente circundante.

En el Cuadro 20.1 se comparan estos tres tipos de sistemas en términos de varios criterios ecológicos. Tal como lo indican los términos incluidos en el Cuadro, los agroecosistemas sostenibles modelan la alta diversidad, la resiliencia y la autonomía de los ecosistemas naturales. Comparados con los sistemas convencionales, tienen rendimientos un poco más bajos y

variables, un reflejo de la variación que ocurre año con año en la naturaleza. Sin embargo, estos rendimientos más bajos son usualmente más que compensados, por la ventaja obtenida al reducir la dependencia en insumos externos y la reducción de los impactos ambientales adversos que los acompañan.

De esta comparación podemos derivar un principio general: *entre más grande la similaridad estructural y funcional de un agroecosistema con los ecosistemas naturales de su región biogeográfica, más grande la probabilidad de que el agroecosistema sea sostenible*. Si este principio es válido, entonces los valores observables y medibles para una serie de procesos, estructuras y tasas de cambio de los ecosistemas naturales, pueden proporcionarnos valores de referencia y valores umbral, que describan o delinee el potencial ecológico para el diseño y manejo de agroecosistemas en un área particular. Es tarea de la investigación determinar qué tan cerca debe estar un agroecosistema de estos valores de referencia para ser sostenible (Gliessman 1990b).

Los Agroecosistemas Tradicionales como Ejemplos de Función Sostenible

Actualmente, en la mayor parte del mundo rural, el conocimiento y las prácticas de la agricultura tradi-

CUADRO 20.1 Propiedades de ecosistemas naturales, agroecosistemas sostenibles y agroecosistemas convencionales

	Ecosistemas Naturales	Agroecosistemas Sostenibles*	Agroecosistemas Convencionales*
Productividad (proceso)	media	media/alta	baja/media
Diversidad	alta	media	baja
Recuperación	alta	media	baja
Estabilidad del producto	media	baja/media	alta
Flexibilidad	alta	media	baja
Desplazamiento humano de procesos ecológicos	bajo	medio	alto
Apoyo con insumos humanos externos	bajo	medio	alto
Autonomía	alta	alta	baja
Sostenibilidad	alta	alta	baja

*Las propiedades atribuidas a estos sistemas son más aplicables a la escala de unidad de producción y para el corto a mediano plazo. Modificado de Odum (1984), Conway (1985) y Altieri (1995b).



FIGURA 20.1
Un ejemplo del agroecosistema tradicional de maíz, altamente productivo de la meseta central de México.

Este sistema, que integra a menudo árboles y cultivos, ha prosperado por cientos de años.

cional siguen siendo la base de mucha de la producción primaria de alimentos. Lo que distingue a los sistemas de producción indígenas y tradicionales de los sistemas convencionales, es que los primeros se desarrollaron predominantemente en tiempos y lugares donde otros insumos que no fueran mano de obra y recursos locales, no estaban disponibles; o donde las alternativas que se encontraron reducían, eliminaban o reemplazaban los insumos humanos intensivos en energía y tecnología comunes en la agricultura convencional de hoy en día. El conocimiento implícito en los sistemas tradicionales refleja la experiencia adquirida por las generaciones pasadas, la que todavía continúa desarrollándose en el presente, como el ambiente cultural y ecológico de los grupos humanos involucrados en un proceso continuo de adaptación y cambio (Wilken 1988).

Muchos sistemas de producción agrícola tradicionales permiten satisfacer las necesidades locales, al mismo tiempo que contribuyen a la demanda de alimentos a nivel regional o nacional. La producción se da en formas que se enfocan más a la sostenibilidad a largo plazo, que solo a la maximización del rendimiento y las ganancias. Los agroecosistemas tradicionales se han usado por mucho tiempo, y durante ese tiempo han experimentado muchos cambios y adaptaciones. El hecho de que aún estén en uso es la evi-

dencia más fuerte de una estabilidad ecológica y social que los sistemas mecanizados modernos pueden envidiar (Klee 1980).

El estudio de los agroecosistemas tradicionales puede contribuir mucho al desarrollo de prácticas de manejo ecológicamente sanas. De hecho, nuestro entendimiento de la sostenibilidad, en términos ecológicos, proviene principalmente del conocimiento generado por tales estudios (Altieri 1990).

¿Cuáles son las características de los agroecosistemas tradicionales que los hacen ser sostenibles? A pesar de la diversidad de estos agroecosistemas en todo el mundo, podemos empezar a contestar esta pregunta examinando lo que la mayoría de los sistemas tradicionales tienen en común. Los agroecosistemas tradicionales:

- no dependen de insumos externos adquiridos en el mercado;
- hacen un uso amplio de recursos renovables y disponibles localmente;
- enfatizan el reciclaje de nutrientes;
- tienen impactos benéficos o con un efecto negativo mínimo en el ambiente, dentro y fuera de la unidad de producción;
- están adaptados o son tolerantes a las condiciones locales, en lugar de depender del control o la alteración total del ambiente;

- son capaces de aprovechar todas las variaciones microambientales en el sistema de cultivo, la unidad de producción y la región;
- maximizan los rendimientos sin sacrificar la capacidad productiva a largo plazo del sistema como un todo y la habilidad de los humanos para usar los recursos de manera óptima;
- mantienen diversidad espacial y temporal, y continuidad;
- conservan la diversidad biológica y cultural;
- se apoyan en el uso de variedades de cultivo locales y a menudo incorporan plantas y animales silvestres;
- usan la producción para satisfacer primero las necesidades locales;
- son relativamente independientes de factores económicos externos; y
- están contruidos sobre el conocimiento y la cultura de los habitantes del lugar.

Las prácticas tradicionales no pueden ser transferidas directamente a las regiones donde la agricultura ya ha sido "modernizada", ni tampoco la agricultura convencional se puede convertir para ajustarse exactamente al modelo tradicional. No obstante, los agroecosistemas y prácticas tradicionales conservan lecciones importantes de cómo debieran diseñarse los agroecosistemas sostenibles modernos. Un sistema sostenible no tiene que tener forzosamente todas las características señaladas arriba, pero debe estar diseñado de tal modo, que se tengan las funciones de esas características.

Si usáramos los agroecosistemas tradicionales, como modelo para diseñar sistemas sostenibles modernos, debemos entender los agroecosistemas tradicionales en todos sus niveles de organización, desde la planta o animal a nivel individual en el campo de cultivo, hasta la producción regional de alimentos, o incluso, más allá. Los ejemplos de prácticas y métodos tradicionales presentados en este libro, ofrecen el principio para entender el proceso de cómo se logra la sostenibilidad ecológica.

Los agroecosistemas tradicionales también pueden proporcionar lecciones valiosas sobre el papel que tienen los sistemas sociales en la sostenibilidad. Para que un agroecosistema sea sostenible, los sistemas económicos y culturales en los cuales las personas participantes están inmersos, deben apoyar y

fomentar prácticas sostenibles y no crear presiones que las debiliten. La importancia de esta relación se hace evidente cuando sistemas tradicionales que eran sostenibles, experimentan cambios que los hacen insostenibles o ambientalmente destructivos. En la mayoría de los casos, la causa subyacente es algún tipo de presión económica, social o cultural. Por ejemplo, frecuentemente los productores tradicionales acortan los períodos de descanso o incrementan los hatos de animales de pastoreo como respuesta a mayores rendimientos u otras presiones económicas, y estos cambios ocasionan erosión o reducción de la fertilidad del suelo. En el siguiente Capítulo, dedicaremos más atención a la relación entre sistemas sociales y sostenibilidad.

Es esencial que los agroecosistemas tradicionales sean reconocidos como ejemplos de un sofisticado conocimiento ecológico aplicado. De otra manera, el llamado proceso de modernización en la agricultura, continuará destruyendo el conocimiento probado en el tiempo que estos sistemas engloban; un conocimiento que podría servir como punto de partida para la conversión a sistemas más sostenibles en el futuro.

LA CONVERSIÓN A PRÁCTICAS SOSTENIBLES

Los productores tienen la reputación de ser innovadores y experimentadores, con voluntad de adoptar nuevas prácticas cuando perciben que pueden obtener algún beneficio. En los últimos 40 - 50 años, la innovación en la agricultura se ha enfocado principalmente en el énfasis en los altos rendimientos y las ganancias por unidad de producción, lo cual ha generado retornos económicos notables, pero también una serie de efectos colaterales negativos en el ambiente. A pesar de que esta enorme presión económica continúa en la agricultura, muchos agricultores convencionales están en transición hacia prácticas ambientalmente más sanas, y que tienen potencial para contribuir a la sostenibilidad del sector a largo plazo (National Research Council 1989). Varios factores están animando a los productores a empezar este proceso de transición:

- el costo ascendente de la energía;
- los bajos márgenes de ganancia de las prácticas convencionales;
- el desarrollo de nuevas prácticas que se vislumbran como opciones viables;
- la creciente conciencia ambiental entre consumi-

dores, productores y entidades reguladoras y,

- mercados nuevos y más fuertes para productos agrícolas cultivados y procesados con métodos alternativos.

A pesar de que los agricultores sufren a menudo una reducción en sus rendimientos y ganancias en el primer o segundo año del período de transición, la mayoría de los que persisten notan eventualmente los beneficios ecológicos y económicos de la conversión. Parte del éxito de la transición, se basa en la habilidad del agricultor para ajustar la economía de operación de la granja a las nuevas relaciones de producción agrícola, las que conllevan una serie de insumos y costos de manejo distintos, así como el ajuste a precios y sistemas de mercado diferentes.

La conversión a un agroecosistema manejado ecológicamente, genera un conjunto de cambios ecológicos en el sistema (Gliessman 1986). A medida que se elimina o reduce el uso de agroquímicos sintéticos, y se recicla la biomasa y los nutrimentos, la estructura y función del agroecosistema también cambian. Un cúmulo de relaciones y procesos se transforman, comenzando con aspectos como la estructura básica del suelo, el contenido de materia orgánica y la diversidad y actividad de la biota del suelo. Eventualmente, también ocurren cambios mayores en la actividad y las relaciones entre arvenses, insectos y enfermedades, y en el balance entre organismos benéficos y perjudiciales. Finalmente, se influye en el reciclaje y dinámica de los nutrimentos, la eficiencia en el uso de energía y la productividad total del sistema. Medir y monitorear estos cambios durante el período de conversión, ayuda al productor a evaluar el éxito de este proceso y proporciona un marco para determinar los requerimientos e indicadores de la sostenibilidad.

Principios Rectores

El proceso de conversión puede ser complejo y requerir cambios en las prácticas de campo, y en el manejo cotidiano, la planeación, la comercialización y la filosofía de la unidad de producción. Los siguientes principios pueden servir como guías generales para transitar a lo largo de esta transformación total:

- Cambiar de un manejo de flujo de nutrimentos, a uno de reciclaje de nutrimentos, con mayor dependencia de procesos naturales como la fijación

biológica de nitrógeno y las relaciones micorrízicas.

- Usar energía de fuentes renovables en reemplazos de fuentes no renovables.
- Eliminar el uso de insumos humanos externos no renovables, que tienen el potencial de dañar el ambiente y la salud de productores, trabajadores del campo o consumidores.
- Cuando se deba agregar materiales al sistema, usar materiales naturales en lugar de usar insumos sintéticos, manufacturados.
- Manejar las plagas, enfermedades y arvenses en lugar de "controlarlas".
- Reestablecer las relaciones biológicas que pueden darse naturalmente en la granja en lugar de reducirlas y simplificarlas.
- Hacer combinaciones más apropiadas entre el patrón de cultivos, y el potencial productivo y las limitaciones físicas del paisaje agrícola.
- Usar una estrategia de adaptación del potencial genético y biológico de los plantas cultivables y especies animales, a las condiciones ecológicas de la granja, y no modificarla para satisfacer las necesidades de cultivos y animales.
- Valorar más el estado general de salud del agroecosistema, que el producto de un sistema de cultivo o el de una temporada del año.
- Enfatizar la conservación del suelo, agua, energía y recursos biológicos.
- Incorporar la idea de la sostenibilidad a largo plazo en el diseño y manejo del agroecosistema en conjunto.

La integración de estos principios crea un sinergismo de interacciones y relaciones en la unidad de producción, que conduce eventualmente al desarrollo de las propiedades de los agroecosistemas sostenibles, mencionadas en el Cuadro 20.1. El énfasis variará en algunos principios en particular, pero todos ellos pueden contribuir en gran medida al proceso de conversión.

Niveles de Conversión

Para muchos agricultores, la conversión rápida al diseño y práctica de un agroecosistema sostenible no es posible ni práctica. Como resultado muchos esfuerzos de conversión se dan más en etapas lentamente hacia

una meta final de la sostenibilidad, o se enfocan simplemente al desarrollo de sistemas de producción de alimentos que son de algún modo más sanos, ambientalmente hablando. De la gama de esfuerzos para la conversión que se han observado, se pueden percibir tres niveles distintos (Hill 1985). Estos niveles nos ayudan a describir los pasos que los productores realmente siguen en la conversión de un agroecosistema convencional, y nos pueden servir como un mapa para delinear paso a paso el proceso de conversión en su evolución. También son útiles para categorizar la investigación agrícola a medida que se relaciona con la conversión.

Nivel 1: Incrementar la eficiencia de las prácticas convencionales para reducir el consumo y uso de insumos costosos, escasos, o ambientalmente nocivos.

La meta de este enfoque es usar los insumos de manera más eficiente, de tal modo que se utilicen menos y al mismo se reduzcan en el tiempo sus impactos negativos. Este método ha sido el énfasis principal de gran parte de la investigación agrícola convencional, mediante la cual se han desarrollado numerosas tecnologías y prácticas agrícolas. Como ejemplo, se pueden mencionar densidades óptimas de siembra, maquinaria renovada, monitoreo de plagas para una aplicación más apropiada de los plaguicidas, optimización de las operaciones agrícolas y, oportunidad y precisión en la aplicación de fertilizantes y riego. Aunque este tipo de esfuerzos reducen los impactos negativos de la agricultura convencional, no ayudan a romper su dependencia de insumos humanos externos.

Nivel 2: Sustituir prácticas e insumos convencionales con prácticas alternativas.

En este nivel, la meta de conversión es reemplazar prácticas y productos que degradan el ambiente y hacen un uso intensivo de los recursos, por aquellas que sean más benignas ambientalmente. La investigación en producción orgánica y agricultura biológica ha enfatizado esta vía. Como ejemplos de prácticas alternativas se puede mencionar el uso de cultivos de cobertura, fijadores de nitrógeno para reemplazar fertilizantes sintéticos nitrogenados, el uso de agentes del control biológico en reemplazo de plaguicidas, y el cambio a la labranza mínima o reducida. En este nivel, la estructura

básica del agroecosistema no se altera significativamente, por lo que muchos de los problemas que se dan en los sistemas convencionales también se dan en aquellos que sustituyen insumos.

Nivel 3: Rediseño del agroecosistema de manera que funcione sobre las bases de un nuevo conjunto de procesos ecológicos.

A este nivel el diseño total del sistema, elimina de raíz las causas de muchos problemas que existen todavía en los niveles 1 y 2. Así, más que encontrar formas más sanas de resolver problemas, se previene su aparición. Los estudios de conversión del sistema en su totalidad, nos permiten entender los factores limitantes del rendimiento en el contexto de la estructura y función del agroecosistema. Se reconocen los problemas y se previenen en el futuro, con enfoques de diseño y manejo internos y tiempos establecidos en lugar de aplicar insumos externos. Un ejemplo es la diversificación del manejo y estructura de la unidad de producción mediante el uso de rotaciones, cultivos múltiples y agroforestería.

En términos de investigación, los agrónomos y otros investigadores agrícolas han hecho buenos aportes en la transición del nivel 1 al nivel 2, pero la transición al nivel 3 recién acaba de empezar. La agroecología proporciona las bases para este tipo de investigación y eventualmente nos ayudará a dar respuesta a preguntas más amplias y abstractas tales como: ¿Qué es la sostenibilidad? y ¿Cómo sabemos que la hemos logrado?.

La Evaluación de los Esfuerzos de Conversión en Granjas Individuales

Mientras los agricultores se dedican a la tarea de reducir su dependencia de insumos artificiales externos y establecen bases ecológicamente más sanas para la producción de alimentos, es importante desarrollar sistemas para evaluar y documentar estos esfuerzos, así como los cambios que generan en el funcionamiento de los agroecosistemas. Tales sistemas de evaluación ayudarán a convencer a segmentos más grandes de la comunidad agrícola, de que la conversión a prácticas sostenibles es posible y económicamente factible.



FIGURA 20.2
La granja experimental en el Centro para Agroecología y Sistemas Alimenticios Sostenibles, Universidad de California, Santa Cruz. En estas instalaciones únicas en su tipo se realiza investigación innovadora en el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles.

El estudio del proceso de conversión hacia la sostenibilidad comienza con la identificación de un sitio de producción. Este debería ser una unidad de producción agrícola comercial en funcionamiento, cuyo propietario y operador desea convertirla a un tipo reconocido de manejo alternativo tal como la agricultura orgánica certificada, y quiere participar en el diseño y manejo de la unidad durante el proceso de conversión (Swezey *et al.* 1994, Gliessman *et al.* 1996). Este enfoque de "primero el productor" se considera esencial en la búsqueda de prácticas agrícolas viables, que eventualmente puedan ser adoptadas por otros agricultores.

El tiempo necesario para completar el proceso de conversión depende en gran medida del tipo de cultivo o cultivos que se tienen, de las condiciones ecológicas donde se encuentra localizada la granja y de la historia previa de manejo y uso de insumos. Para cultivos anuales, el período de tiempo podría ser tan corto como tres años, y para sistemas ganaderos y cultivos perennes, el período es probablemente de al menos cinco años o más.

El estudio del proceso de conversión implica varios niveles de análisis y toma de datos:

1. Examina los cambios en los procesos y factores ecológicos en el tiempo mediante muestreos y seguimiento.
2. Observa cómo cambian los rendimientos con el cambio de prácticas, insumos, diseños y manejo.
3. Entiende los cambios en el uso de energía, mano de obra y rentabilidad que acompañan los cambios mencionados anteriormente.
4. Basado en observaciones acumuladas, identifica los indicadores clave de la sostenibilidad y continúa su seguimiento en el futuro.
5. Identifica los indicadores que son de fácil acceso al productor y pueden ser adaptados para programas de seguimiento en granjas, pero que están relacionados con nuestra comprensión de la sostenibilidad ecológica.

En cada ciclo agrícola, se pueden evaluar los resultados de la investigación, los factores ecológicos particulares del sitio de estudio, las habilidades y conocimiento del agricultor, y las nuevas prácticas y técnicas, para determinar si deben hacerse algunas modificaciones, para superar cualquier factor limitante del rendimiento que se haya identificado. Los componentes ecológicos de la sostenibilidad del sistema son identificables en esta fase, y eventualmente también se pueden combinar con un análisis de la sostenibilidad económica.

ESTUDIO DE CASO

Conversión a la Producción Orgánica de Manzanas

Aunque los sistemas manejados orgánicamente pueden no ser completamente sostenibles, su énfasis es en prácticas más sostenibles que las que se usan en los sistemas convencionales. Sin embargo, los agricultores que desean convertir su producción convencional a orgánica, están preocupados por algo más que sólo el mérito ecológico de la agricultura orgánica certificada. Estos productores quieren saber de las consecuencias económicas de la conversión, si pueden mantener a sus familias con las ganancias de la operación de la producción orgánica.

En reconocimiento de esas preocupaciones prácticas, los investigadores han estudiado el proceso de conversión, y comparado la viabilidad económica del manejo orgánico y el convencional. En uno de estos estudios, un equipo de investigadores del Centro para Agroecología y Sistemas Alimentarios Sostenibles (CASFS, por sus siglas en inglés) en la Universidad

de California, Santa Cruz, analizó la transición del manejo convencional al orgánico de manzanas Granny Smith, en una granja en Watsonville, California (Swezey *et al.* 1994). El equipo monitoreó los parámetros ecológicos de la transición, incluyendo el contenido de nutrimentos de las plantas, especies y abundancia de arvenses, daño por plagas y el ciclo biológico de la palomilla de la manzana, la plaga más importante. Este seguimiento cuidadoso permitió al equipo ajustar sus estrategias de manejo según las necesidades. Estas estrategias incluían la aplicación de enmiendas orgánicas al suelo y la interrupción del ciclo de apareamiento de la palomilla de la manzana, mediante el uso de feromonas que las confundían.

El equipo también registró los ingresos y los costos durante el período de estudio. El sistema orgánico usó 10% más mano de obra que el sistema convencional, debido a prácticas tales como el aclareo de flor en los manzanos y el costo de materiales fue 17% más alto que en el sistema convencional. No obstante, el sistema orgánico dio un rendimiento más alto en términos de cantidad y masa total de manzanas. En general, el sistema orgánico también

dio un retorno económico más alto, debido a un mayor rendimiento y a un precio más alto obtenido en el mercado para manzanas orgánicas de calidad.

Este estudio demuestra que la producción orgánica de manzanas puede ser rentable, aunque la transición de convencional a orgánico certificado lleva una cuidadosa planeación y puede ser intensiva en mano de obra. Para que la transición sea exitosa se debe prestar especial atención al complejo natural de plagas, la disponibilidad y el reciclaje de nutrimentos. Además, las estrategias de manejo se deben trabajar de acuerdo con las condiciones locales, más que intentar alterar el sistema para compensarlo debido a estas.



FIGURA 20.3

Manzanos injertados en patrón semienano en conversión a manejo orgánico, Corralitos, California.

ESTABLECIENDO CRITERIOS PARA LA SOSTENIBILIDAD AGRÍCOLA

Si estamos preocupados por mantener la productividad de nuestros sistemas de producción de alimentos a largo plazo, debemos ser capaces de distinguir entre sistemas que son productivos temporalmente por la gran cantidad de insumos, y aquellos cuya productividad perdura indefinidamente. Esto implica que seamos capaces de predecir hacia dónde se dirige un sistema; o sea, cómo va a cambiar su productividad en el futuro. Esto lo podemos hacer mediante el análisis de los procesos y condiciones del agroecosistema en el presente.

El problema central es saber cómo los parámetros ecológicos del sistema están cambiando en el tiempo. ¿Las bases ecológicas de la productividad del sistema se están manteniendo o mejorando, o se están degradando de alguna manera? Un agroecosistema que será improductivo algún día nos da numerosas pistas sobre su condición futura. Sus fundamentos ecológicos pueden estarse destruyendo a pesar de seguir dando rendimientos aceptables: la erosión progresiva de la capa arable del suelo; acumulación de las sales; reducción de la diversidad de la biota del suelo. Los insumos en fertilizantes y plaguicidas permiten enmascarar estos signos de degradación pero, hay algunos que pueden ser detectados por el agricultor o el investigador. En contraste, un agroecosistema sostenible, no mostrará signos de degradación oculta. La profundidad de la capa arable de su suelo se mantendrá estable o se incrementará; la diversidad de su biota del suelo persistirá consistentemente en niveles altos.

Sin embargo, en la práctica no es tan fácil como parece ser, distinguir entre sistemas que se están degradando y los que no. Una multitud de parámetros ecológicos, todos interactuando, determinan la sostenibilidad; considerar cada uno independientemente o apoyarse en sólo unos pocos puede ser erróneo. Además, algunos parámetros son más críticos que otros y los logros en un área pueden compensar las pérdidas en otra. Un reto para la investigación agroecológica es aprender cómo interactúan los parámetros y cómo determinar su importancia relativa (Gliessman 1984, 1987, 1995, Edwards 1987).

Además, el análisis de la sostenibilidad o insostenibilidad de los agroecosistemas se puede aplicar en una variedad de formas. Los investigadores o agricul-

tores pueden usar alguna de las siguientes, en forma individual o combinada:

- Proporcionar evidencia de insostenibilidad en una unidad de producción para motivar cambios en ella.
- Proveer evidencia de la insostenibilidad de sistemas o prácticas convencionales en forma general, para argumentar cambios en la política agrícola o valores sociales con respecto a la agricultura.
- Predecir cuánto tiempo puede mantenerse productivo un sistema.
- Prescribir formas específicas para evitar un colapso productivo en ausencia del rediseño completo del agroecosistema.
- Prescribir formas de conversión a una ruta sostenible mediante el rediseño completo del agroecosistema.
- Sugerir maneras de restaurar o regenerar un agroecosistema degradado.

Aunque estas aplicaciones del análisis de la sostenibilidad coinciden, cada una representa un énfasis distinto y requiere un enfoque diferente de investigación.

El Índice de Productividad

Un aspecto importante del análisis de la sostenibilidad es considerar el sistema en su totalidad, para analizar uno de los procesos más básicos del agroecosistema la producción de biomasa. La agricultura convencional está interesada en este proceso en términos de rendimiento. Cómo se obtenga la cosecha o **producción** no es tan importante, mientras la producción sea tan alta como sea posible. Para los agroecosistemas sostenibles; sin embargo, solo la medida de la producción no es adecuada, porque la meta es la producción sostenible. Esto significa centrarse en la **productividad** el conjunto de procesos y estructuras seleccionados y mantenidos activamente por el productor para producir la cosecha.

Desde una perspectiva ecológica, la productividad es un proceso de los ecosistemas que implica la captura de la energía lumínica y su transformación en biomasa. Es en esta biomasa finalmente, en la que descansan los procesos de la producción sostenible. Así, en un agroecosistema sostenible, la meta es opti-

mizar el proceso de productividad, de tal forma que asegure el rendimiento más alto posible sin causar degradación ambiental, más que pugnar por el rendimiento máximo a cualquier costo. Si los procesos de productividad son ecológicamente sanos, la producción sostenible sobrevendrá.

Una forma de cuantificar la productividad es medir la cantidad de biomasa invertida en el producto cosechado, en relación con la cantidad total de biomasa en pie presente en el resto del sistema. Esto se hace mediante el uso del **índice de productividad** representado por la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de Productividad (IP)} = \frac{\text{Total de biomasa acumulada en el sistema}}{\text{Productividad Primaria Neta (PPN)}}$$

El índice de productividad proporciona una manera para medir el potencial de un agroecosistema, para producir sosteniblemente un producto cosechable. Esta puede ser una herramienta valiosa para el diseño y evaluación de agroecosistemas sostenibles. El valor IP se puede usar como indicador de sostenibilidad, si asumimos que existe una correlación positiva entre el retorno de biomasa a un agroecosistema y la habilidad de ese sistema para suministrar un producto cosechable.

El valor del índice de productividad variará desde menos de 1, para los sistemas de cultivo anuales más extractivos a más de 50, en algunos ecosistemas naturales, especialmente en ecosistemas en los estadios tardíos de la sucesión. Entre más alto el IP de un sistema, más grande será su habilidad para mantener una cierta producción de cosecha. Para un sistema de cultivo intensivo anual, el valor umbral de sostenibilidad es 2. En este nivel, la cantidad de biomasa que regresa al sistema cada ciclo, es igual a lo que se removió como producción, lo que equivale a decir que la mitad de la biomasa producida durante el ciclo se cosecha, y la otra mitad se reintegra al sistema.

La PPN no varía mucho entre tipos de sistemas (entre 0 a 30 t/ha/año); lo que realmente varía de sistema a sistema es la biomasa en pie (entre 0 y 800 t/ha). Cuando una porción mayor de la PPN se acumula como biomasa o cultivo en pie, el IP se incrementa, así como la habilidad para cosechar biomasa sin comprometer el funcionamiento sostenible del sistema. Una forma de incrementar la biomasa en pie del sistema, es combinar especies anuales y perennes en un patrón alternado en el tiempo y el espacio.

Para aplicar el IP más eficientemente, debemos de tener respuesta para una serie de preguntas: ¿Cómo se pueden sostener en el tiempo valores de IP más altos? ¿Cuál es la proporción de retorno de biomasa, de la cantidad de biomasa cosechada relacionada al



FIGURA 20.4
El tradicional agroecosistema chino de huerto familiar con estanque, campo inundable y camas para hortalizas. El retorno continuo de todas las formas de materia orgánica al agroecosistema mantiene un alto índice de productividad.

proceso de productividad? ¿Cuál es la relación entre la biomasa o cultivo en pie y la capacidad para remover biomasa como cosecha o producción?

Condiciones Ecológicas de la Función Sostenible

El marco ecológico que se ha descrito en este libro, proporciona una serie de parámetros ecológicos que se pueden estudiar y monitorear en el tiempo, para evaluar la transición hacia la sostenibilidad o a la insostenibilidad. Estos parámetros incluyen aspectos tales como diversidad de especies, contenido de materia orgánica y profundidad de la capa arable del suelo. Para cada parámetro, la teoría ecológica sugiere un tipo general de condición o cualidad que es necesaria para el funcionamiento sostenible del sistema

tal como la alta diversidad, alto contenido de materia orgánica y capa arable de gran espesor. Las tasas específicas, niveles, valores y estatus de estos parámetros, que juntos indican una condición de sostenibilidad, variarán sin embargo para cada agroecosistema, debido a las diferencias en el tipo de unidad de producción, recursos utilizados, clima local y otras variables específicas al lugar donde están localizados. Cada sistema por lo tanto, se debe estudiar separadamente para generar conjuntos de indicadores de sostenibilidad específicos.

Los parámetros enumerados en el Cuadro 20.2, proveen un marco para enfocar la investigación según los requerimientos para la sostenibilidad de un agroecosistema. Las explicaciones de la función de cada parámetro en un sistema sostenible no se proporcionan aquí. El lector puede acudir al capítulo en

CUADRO 20.2 Parámetros relacionados con la sostenibilidad del agroecosistema

A. Características del recurso suelo

A largo plazo

- a. profundidad del suelo, especialmente la capa arable y el horizonte orgánico
- b. porcentaje de contenido de materia orgánica en la capa arable y su calidad
- c. densidad aparente y otras medidas de compactación en la capa arable
- d. tasas de infiltración y percolación de agua
- e. niveles de minerales y salinidad
- f. capacidad de intercambio catiónico y pH
- g. proporción de niveles de nutrimentos, particularmente C:N

A corto plazo

- h. tasas anuales de erosión
- i. eficiencia en la absorción de nutrimentos
- j. disponibilidad y fuentes de nutrimentos esenciales

B. Factores Hidrogeológicos

Eficiencia en el uso del agua en la unidad de producción

- a. tasas de infiltración de agua de riego o precipitación
- b. capacidad de retención de humedad del suelo
- c. tasas de pérdida por erosión
- d. cantidad de agua estancada, especialmente en la zona de las raíces
- e. efectividad del drenaje
- f. distribución de la humedad del suelo en relación con las necesidades de la planta

Flujo de agua superficial

- g. sedimentación de cursos de agua y tierras bajas cercanas
- h. niveles y transporte de agroquímicos
- i. tasa de erosión superficial y formación de cárcavas
- j. efectividad de los sistemas de conservación en reducir las fuentes de contaminación no centralizada

Calidad del manto freático

- k. movimiento del agua en el perfil del suelo

CUADRO 20.2 Parámetros relacionados con la sostenibilidad del agroecosistema (continuación)

-
- l. lixiviado de nutrimentos, especialmente nitratos
 - m. lixiviado de plaguicidas y otros contaminantes
- C. Factores Bióticos
- En el suelo*
- a. biomasa microbiana total en el suelo
 - b. tasas de retorno de biomasa
 - c. diversidad de microorganismos del suelo
 - d. tasas de reciclaje de nutrimentos en relación con la actividad microbiana
 - e. cantidades de nutrimentos o biomasa almacenados en diferentes bancos del agroecosistema
 - f. balance entre microorganismos benéficos y patógenos
 - g. estructura y función de la rizosfera
- Arriba del suelo*
- h. diversidad y abundancia de las poblaciones de plagas
 - i. grado de resistencia a plaguicidas
 - j. diversidad y abundancia de enemigos naturales y organismos benéficos
 - k. diversidad y traslape de nichos
 - l. durabilidad de las estrategias de control
 - m. diversidad y abundancia de plantas y animales nativos
- D. Características a Nivel del Ecosistema
- a. producto anual
 - b. componentes del proceso de productividad
 - c. diversidad: estructural, funcional, vertical, horizontal, temporal
 - d. estabilidad y resistencia al cambio
 - e. resiliencia y recuperación de las perturbaciones
 - f. intensidad y origen de insumos externos
 - g. fuentes de energía y eficiencia de uso
 - h. eficiencia y tasas del reciclaje de nutrimentos
 - i. tasas de crecimiento de la población
 - j. complejidad e interacciones de la comunidad
- E. Economía Ecológica (Rentabilidad de la granja)
- a. costos y beneficios por unidad de producción
 - b. tasa de inversión en activos tangibles y conservación
 - c. deudas y tasas de interés
 - d. variación de los retornos económicos en el tiempo
 - e. apoyo en insumos subsidiados o precios de garantía
 - f. retorno neto relativo de las inversiones y prácticas ecológicas
 - g. externalidades fuera de la granja y costos derivados de prácticas de producción
 - h. estabilidad del ingreso y diversidad de prácticas de producción
- F. El Ambiente Social y Cultural
- a. equidad en los beneficios al productor, trabajador agrícola y consumidor
 - b. autonomía y nivel de dependencia de fuerzas externas
 - c. autosuficiencia y el uso de recursos locales
 - d. justicia social, especialmente intracultural e intergeneracional
 - e. equidad en la participación en el proceso de producción
-

el cual se discute cada factor en detalle, su importancia y cómo podría ser medido. Los aspectos económicos y sociales de la sostenibilidad se discuten brevemente en el último capítulo, y el lector puede consultar las lecturas recomendadas para mayor información y profundidad.

Investigación Futura en la Sostenibilidad

Hay una urgente necesidad de realizar más investigación sobre la sostenibilidad de los agroecosistemas. Los principios sobre los cuales se puede construir la sostenibilidad están bien establecidos (y se han discutido en detalle en este texto), pero carecemos del conocimiento necesario más detallado para aplicar estos principios al diseño de sistemas sostenibles y a la conversión global de la agricultura a la sostenibilidad.

Una razón importante de esta carencia de conocimiento, es que los recursos y esfuerzos en investigación agrícola, durante mucho tiempo, se han concentrado en otras preocupaciones. La investigación se ha enfocado a maximizar la producción, estudiar los componentes del sistema, evaluar los resultados basados en primer término, en el retorno económico a corto plazo, contestar las preguntas que involucran el entorno inmediato de la producción, y a servir a las necesidades y demandas inmediatas de la agricultura como una industria independiente (Allen y Van Dusen 1988, Buttel y Curry 1992). El resultado ha sido el desarrollo de una agricultura industrial de altos rendimientos, que está experimentando gran dificultad para responder a las inquietudes sobre la calidad ambiental, la conservación de los recursos, los alimentos confiables, la calidad de la vida rural y la sostenibilidad de la agricultura en sí.

Sin embargo, en los últimos años el énfasis en la agricultura se ha empezado a dirigir a la maximización de rendimientos y beneficios a corto plazo, y a valorar la capacidad de sostener la productividad a largo plazo. Aunque este cambio es leve y todavía no representa la transformación de la agricultura en su totalidad, es una oportunidad para acompañarlo con un giro en la investigación agrícola.

Usando un Marco Ecológico

El emergente enfoque agroecológico, permite a la investigación aplicar un marco integrador a nivel de sis-

tema, comprometido con el manejo a largo plazo (Stinner y House 1987, Gliessman 1995). La investigación agroecológica estudia el cimiento ambiental del agroecosistema, así como el complejo de procesos implicados en el mantenimiento de la productividad a largo plazo. También, establece las bases ecológicas de la sostenibilidad en términos del uso y conservación de los recursos, incluyendo el suelo, el agua, los recursos genéticos y la calidad del aire. Así mismo, analiza las interacciones entre los muchos organismos del agroecosistema, empezando a nivel de individuo y terminando a nivel del ecosistema, a medida que se revela la dinámica del ecosistema en su conjunto.

Los conceptos y principios ecológicos en los cuales está basada la agroecología, establecen una perspectiva del sistema en su totalidad para el diseño y manejo de sistemas agrícolas sostenibles. La aplicación de métodos ecológicos es esencial para determinar: (1) si una práctica agrícola en particular, un insumo o una decisión de manejo es sostenible, y (2) cuál es el fundamento ecológico para el funcionamiento a largo plazo de la estrategia de manejo escogida.

La perspectiva holística de la agroecología significa que en lugar de enfocar la investigación en problemas muy específicos, o en una sola variable en un sistema de producción, estos problemas o variables se estudian como parte de una unidad mayor. No hay duda de que ciertos problemas requieren investigación especializada, pero en los estudios agroecológicos cualquier enfoque puntual necesario es visto en el contexto de un sistema más grande. Los impactos que se perciben afuera de la unidad de producción, como resultado de una estrategia particular de manejo (ejemplo, una reducción en la biodiversidad local), pueden ser parte del análisis agroecológico. Esta ampliación del contexto de la investigación se extiende también al ámbito social el paso final en la investigación agroecológica es entender la sostenibilidad ecológica en el contexto de los sistemas económicos y sociales.

La Cuantificación de la Sostenibilidad

Para que la investigación agroecológica contribuya a lograr una agricultura más sostenible, debe establecerse un marco para medir y cuantificar la sostenibilidad (Liverman *et al.* 1988, Gliessman 1990b). Los agricultores deben ser capaces de evaluar un sistema específico para determinar qué tan lejos está de la

CUADRO 20.3 Parámetros ecológicos selectos cuantificables y sus valores mínimos aproximados para la función sostenible de agroecosistemas específicos

	Nivel mínimo para la sostenibilidad	Agroecosistema	Fuente
Contenido de materia orgánica	2,9%	Fresas en California	Gliessman <i>et al.</i> (1996)
Proporción insumo: pérdida de cosecha por cada macronutriente	balance neto positivo en el tiempo	cultivos mixtos de roturación en Costa Rica	Jansen <i>et al.</i> (1995)
Índice de uso de biocidas ^a	mantener a un nivel menor de 15	cultivos mixtos de roturación en Costa Rica	Jansen <i>et al.</i> (1995)
Capital biofísico del ecosistema ^b	GPP-NPP < 1	Variable	Giampietro <i>et al.</i> (1994)
Actividad enzimática del suelo	150 micro gramos p-nitrofenol/g/ha	forraje/pasto; semilla/hortalizas	Dick (1994)
Cultivo en pie en su desarrollo máximo	>300 gramos/m ²	pastizal perenne	Risser (1995)
Diversidad de especies vegetales	índice de Shannon > 5,0	pastizal perenne	Risser (1995)

^a Índice basado en varios factores incluyendo tasas de uso, toxicidad y área asperjada; valores mayores de 50 se consideran indicadores de uso excesivo de biocidas.

^b Definido como la captura adecuada de energía solar para sostener los ciclos de materia en un ecosistema.

sostenibilidad, cuáles de sus aspectos son los menos sostenibles, exactamente cómo está siendo afectada la sostenibilidad, y cómo se puede cambiar para lograr ser sostenible. Una vez que se diseña un sistema con la intención de que sea sostenible, los agricultores deben ser capaces de darle seguimiento para determinar si se ha logrado este funcionamiento.

Las herramientas metodológicas para completar esta tarea pueden tomarse prestadas de la ecología. La ecología ha desarrollado un conjunto de metodologías para la cuantificación de características del ecosistema, tales como el reciclaje de nutrientes, el flujo de energía, la dinámica poblacional, la interacción de las especies y la modificación del hábitat. Usando estas herramientas, las características de los agroecosistemas y cómo son afectados por los humanos se pueden estudiar desde un nivel tan específico como un individuo de una especie, hasta un nivel tan amplio como el del ambiente global.

Un enfoque es analizar agroecosistemas específicos, para cuantificar el nivel en que un parámetro ecológico en particular o un conjunto de parámetros,

se deben dar para que se cumpla la función de sostenibilidad. Pocos investigadores han trabajado en esta orientación y algunos de sus resultados se presentan en el Cuadro 20.3. (A pesar de que los resultados están dados en forma individual, es importante recordar que éstos deben ser usados e interpretados en el contexto del sistema como un todo y el complejo de factores que interactúan de los cuales son solamente una parte). La escasez de este tipo de datos indica que todavía se requiere mucha investigación.

Otro tipo de enfoque es comenzar con todo el sistema a la vez. Por ejemplo, algunos investigadores han trabajado en el desarrollo de métodos para determinar la probabilidad de que un agroecosistema sea sostenible a largo plazo (Fearnside 1986, Hansen y Jones 1996). Usando el sistema como marco para medir la capacidad de carga de un paisaje en particular, estos autores aplican una metodología para integrar las tasas de cambio de un rango de parámetros de sostenibilidad y determinar qué tan rápidamente se dan los cambios para lograr una meta específica, o lo contrario. Este tipo de análisis está limitado por la

ESTUDIO DE CASO

Sostenibilidad de un Agroecosistema en un Pueblo de China

Aunque a menudo es fácil identificar procesos que están degradando un sistema, es mucho más difícil determinar cuáles procesos son necesarios para una productividad sostenible. Debido a que el término "sostenible" describe un proceso que mantendrá la productividad durante un período indefinido de tiempo, es difícil encontrar indicadores de sostenibilidad que se puedan medir a corto plazo.

Una forma de buscar estos indicadores es estudiar sistemas que tienen registros históricos, sistemas que han mantenido una producción constante de alimentos para el consumo humano durante un largo período de tiempo, sin degradar sus bases ecológicas. El investigador Erle Ellis sigue esta estrategia en su estudio de la agricultura sostenible de la región del delta del río Yangtze en China (Ellis y Wang 1997). En esta área se han documentado altos rendimientos sostenidos con un manejo humano intensivo desde tiempos antiguos. Como parte de su intento por entender lo que ha contribuido a esta producción sostenida, Ellis ha compilado la historia de la agricultura de la región, que analiza muchos factores incluyendo características del paisaje, clima, suelos y prácticas de manejo.

La meta actual de Ellis es dilucidar los mecanis-

mos agroecológicos que subyacen en la sostenibilidad de la agricultura de esta área. Con este propósito está estudiando el ciclo de nutrientes a nivel de todo un pueblo, pues cree que el estudio, a esta escala, le permite compensar la variabilidad que existe entre las prácticas del productor individual y la variabilidad del paisaje, y de ahí extraer conclusiones más precisas. Esto también le permite discernir procesos globales que podrían ser invisibles a nivel de campos de cultivo.

Dado que la evidencia sugiere que el nitrógeno es el factor limitante en los agroecosistemas chinos, Ellis ha establecido el ciclo y manejo de este nutriente como el centro de su investigación. El se propone identificar las prácticas específicas y los procesos del sistema que mantienen los niveles adecuados de nitrógeno en el suelo, sin la aplicación de fertilizantes inorgánicos.

Aunque este estudio todavía no se ha terminado, Ellis ha identificado varios factores que cree que han sido esenciales en el mantenimiento de la fertilidad del nitrógeno. Uno de los más importantes es el uso de insumos naturales como los sedimentos de los canales locales. La fijación biológica del nitrógeno también parece tener una función significativa. Un tercer factor importante es el cuidadoso reciclaje de nutrientes. Prácticamente todos los desperdicios orgánicos incluyendo el excremento humano se reciclan en el sistema del poblado, ya sea regresados directamente al campo o después como compost.

La dificultad de escoger cuáles parámetros se integran al modelo. No obstante, tiene el potencial de convertirse en una herramienta que nos permita predecir si un sistema será capaz de continuar indefinidamente o no.

Estableciendo de un Contexto más Amplio

Un enfoque agroecológico es más que la ecología aplicada a la agricultura. Debe considerar una perspectiva cultural a medida que se expande para incluir a los humanos y sus impactos en los ambientes agrícolas. Los sistemas agrícolas se desarrollan como resultado de la coevolución que ocurre entre cultura y ambiente, y una agricultura verdaderamente sostenible valora tanto los componentes ecológicos como los

humanos, así como la interdependencia que se desarrolla entre ambos.

Una de las debilidades de la investigación agrícola convencional, es la forma en la que ha ignorado los impactos económicos y sociales de la modernización agrícola, debido a que su atención se centra solamente en los problemas de producción. La investigación agroecológica no puede cometer el mismo error. Además de prestar más atención al fundamento ecológico del que la agricultura finalmente depende, la investigación agroecológica debe entender a la agricultura dentro de su contexto social. El comprender los agroecosistemas como sistemas socioecológicos, permitirá la evaluación de calidad de los agroecosistemas, tales como los efectos a largo plazo de diferen-

tes estrategias insumo/producto, la importancia del elemento humano en la producción y la relación entre los componentes económicos y ecológicos del manejo sostenible del agroecosistema.

Ideas para Meditar

1. ¿Cuáles son algunas de las fuerzas que están minando la sostenibilidad ecológica de muchos sistemas agrícolas tradicionales a largo plazo y cómo podrían ser contrarrestadas?
2. Describa una característica o componente de un sistema agrícola tradicional, que podría tener gran aplicación en los sistemas agrícolas convencionales si la sostenibilidad fuera una meta prioritaria.
3. Si usted fuera a manejar una granja en su comunidad, la cual tiene una larga historia de manejo convencional, ¿Cuáles serían algunos de los cambios que haría en primer lugar para comenzar el proceso de transición a un manejo sostenible?
4. ¿Cuánto tiempo cree que se necesita para convertir una unidad de producción agrícola de un manejo no sostenible a uno sostenible? ¿Cuáles variables podrían influir en la duración del período de conversión?

Lecturas Recomendadas

Doran, J.W., D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, y B.A. Stewart. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America Special Publication Number 35, Soil Science Society of America: Madison, WI.

Memorias de un Simposio sobre el concepto de calidad del suelo, como una forma de evaluar el papel de éstos en la agricultura sostenible.

Dover, M.J. y L.M. Talbot. 1987. *To Feed the Earth: Agro-ecology for Sustainable Development*. World Resources Institute: Washington, D.C.

Elocuente revisión de la integración de la agroecología y el conocimiento agrícola tradicional como base para la sostenibilidad de los países en desarrollo.

Edwards, C.A., R.I. Lal., P. Madden, R.H. Miller, y G. House. 1990. *Sustainable Agricultural Systems*. Soil

and Water Conservation Society: Ankeny, IA.
Revisión de diversas investigaciones en todo el mundo sobre los agroecosistemas en el contexto de la sostenibilidad.

Francis, C.A., D. Butler-Flora, y L.D. King. (eds.) 1990. *Sustainable Agriculture in Temperate Zones*. Wiley & Sons: New York.

Análisis profundo sobre enfoques de la sostenibilidad en sistemas agrícolas templados.

Gliessman, S.R. (ed.) 1990. *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. Springer Verlag Series in Ecological Studies #78: New York.

Un volumen sobre enfoques de investigación en el campo de la agroecología y la sostenibilidad.

Klee, G. 1980. *World Systems of Traditional Resource Management*. Halstead: New York.

Panorama de una serie de sistemas de manejo tradicional de los recursos naturales, incluyendo los agroecosistemas, que demuestra la estrecha relación entre cultura y su ambiente.

Marten, G.G. 1986. *Traditional Agriculture in Southeast Asia: A Human Ecology Perspective*. Westview Press: Boulder, Colorado.

Se usa una perspectiva de ecología cultural para examinar el valor de la agricultura tradicional y las necesidades de esos sistemas en el futuro.

Munasinghe, M. y W. Shearer. (eds.) 1995. *Defining and Measuring Sustainability: The Biogeophysical Foundations*. The World Bank: Washington D.C.

Una compilación muy útil que explora los fundamentos biogeofísicos para definir y medir la sostenibilidad; aporta consideraciones sobre políticas para el desarrollo de la comunidad internacional.

National Research Council. 1989. *Alternative Agriculture*. National Academy Press: Washington, D.C.

Excelente revisión del movimiento de agricultura alternativa en los Estados Unidos, sus motivaciones y futuro.

DESDE UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE A SISTEMAS ALIMENTICIOS SOSTENIBLES

En este libro nos hemos enfocado en los procesos ecológicos de la agricultura, con un punto de vista enfocado en lograr una agricultura sostenible en términos ecológicos. Hemos analizado el desarrollo de prácticas y tecnologías que mejoran el rendimiento de los cultivos, reducen la dependencia de insumos externos y protegen el ambiente en la granja. La implementación de estas prácticas y los conceptos y principios ecológicos en los que están basados, son críticos para alcanzar la sostenibilidad. Sin embargo, esto no es suficiente.

Si la agricultura como un todo llega a ser verdaderamente sostenible, todos los aspectos de la producción de alimentos, distribución y consumo deben ser incluidos en esta descripción. Esto significa la transformación de los sistemas alimenticios globales, que llegan casi a todos los aspectos de la sociedad humana y a la construcción del ambiente. Los sistemas alimenticios son muchos más grandes que el cultivo, lo que hace a la sostenibilidad algo más que sólo los agricultores (Buttel 1993, Faeth 1993). Es el complejo de interacciones de todas las partes ecológicas, técnicas, sociales y económicas de nuestro sistema alimenticio lo que determina que estos sistemas puedan ser sostenibles a largo plazo.

UNA AGENDA MÁS AMPLIA

Mucha de la investigación y extensión convencional de las instituciones, han comenzado a incorporar el concepto de sostenibilidad en sus programas, pero continúan teniendo un enfoque limitado. Usualmente se enfocan en las maneras de incrementar la producción y aumentar los beneficios, utilizando menos energía e insumos, dando poco énfasis a la protección del ambiente más allá de la granja y fallando al tomar en consideración las muchas y complejas condiciones sociales y económicas que afectan la granja y las co-

munidades agrícolas. Es tiempo de que estas instituciones amplíen su enfoque para incluir por completo los sistemas alimenticios y la agroecología ofrece los que proveen los fundamentos para hacerlo.

Mas Allá de la Granja Individual

Las discusiones actuales sobre agricultura sostenible van mucho más allá de lo que ocurre entre los límites de cualquier parcela o granja individual (Ikerd 1993, Schaller 1993, UNDP 1995). Un agricultor que ahora utiliza prácticas agrícolas sostenibles, sabe que la agricultura es más que una actividad productiva en la cual la meta es aumentar la producción de un cultivo en una estación –debe también mantener las condiciones de la granja que permiten la productividad de una estación a la siguiente. Pero después, el agricultor no puede solamente poner atención a las necesidades de su granja y esperar manejar adecuadamente las consideraciones para la sostenibilidad a largo plazo.

En muchas formas la agricultura es como un arroyo, con parcelas o granjas individuales que son estanques diferentes a lo largo de su cauce. Muchas cosas fluyen dentro de una granja desde la parte superior del arroyo y muchas cosas fluyen hacia afuera también. Los agricultores trabajan duro para mantener sus granjas productivas, son cuidadosos con el suelo y con lo que le añaden al ambiente de la granja y lo que extraen como cosecha; así, cada estanque a lo largo del arroyo tiene su propio cuidador. Anteriormente cada agricultor podía mantener su propio depósito en el arroyo funcionando bastante bien, no tenía que preocuparse mucho de lo que ocurría arriba o abajo del arroyo.

Pero este enfoque de “cuidar lo tuyo” actualmente tiene sus límites. Una razón es que cada individuo tiene menos y menos control sobre lo que fluye den-



FIGURA 21.1

Una granja orgánica diversa en Davenport, California, EE.UU. La diversidad en la parcela se combina con el ambiente fuera de ella, en la medida en que el agricultor extiende su visión "aguas abajo" de la granja.

tro de su propio depósito desde la parte superior del arroyo. Muchas cosas no deseadas bajan por el arroyo, incluyendo plaguicidas, semillas de arvenses, enfermedades y agua contaminada de otras parcelas o granjas. Además, el agricultor tiene poco control de muchas cosas en la parte superior del arroyo. Estas necesidades incluyen trabajo, un mercado para los productos de la granja, agua para riego y tierras de labranza. Un resultado de la influencia de la parte superior del arroyo—más tarde complicadas por las políticas legislativas sobre la granja y las fluctuaciones del tiempo y del mercado—es que éste viene enteramente enlodado y el trabajo de mantener limpio el estanque propio llega a ser muy difícil.

Cada vez más, cada agricultor debe considerar un segundo problema, la manera de cómo cuidar la granja puede tener muchos efectos en la parte baja del arroyo. La erosión del suelo y la disminución del manto freático pueden afectar negativamente las parcelas o granjas vecinas. El mal o ineficiente uso de plaguicidas y fertilizantes puede contaminar el agua y el aire, también puede dejar residuos potencialmente dañinos sobre la comida que los otros consumen. Lo bien que el agricultor lo hace en su granja también tiene influencia sobre la viabilidad de la economía ru-

ral de ésta y a un nivel más amplio de la cultura. Ambos factores, los de aguas arriba y los de aguas abajo, están ligados en formas complejas que de distintas maneras afecta la sostenibilidad de cada granja.

La necesidad de mirar el arroyo entero significa adoptar un enfoque de sistema completo para alcanzar la sostenibilidad. No podemos contentarnos con enfocar primero el desarrollo de prácticas y tecnologías que son designadas para la parcela o granja individual. Cuando las nuevas tecnologías son evaluadas, principalmente por su capacidad para incrementar la producción y reducir los costos y, sólo en segundo término en la reducción de los impactos ambientales negativos, tienen poca opción de contribuir a la sostenibilidad a lar-

go plazo. En esta evaluación deben incluirse los impactos más complejos sobre el sistema agrícola total.

Más Allá de la Línea Base

La agricultura es mucho más que una actividad económica. Una operación agrícola que no sea económicamente viable no existirá por mucho tiempo. Aún más, si los factores económicos—definidos con una visión parcial—permanecen como el criterio más importante para determinar qué se produce y cómo se produce, la agricultura nunca podrá ser sostenible a largo plazo.

Las fuerzas de trabajo en una economía de mercado junto con varias estructuras políticas definidas para regularlo, a menudo están en conflicto con las metas de la sostenibilidad. Las variaciones determinadas por los mercados para los costos de los insumos agrícolas y los precios que los agricultores reciben por su producción, constantemente crean incertidumbre y fluctuaciones dentro de la producción agrícola. En respuesta, los agricultores son forzados a tomar decisiones basadas en realidades económicas actuales más que sobre principios ecológicos. Muchos gobiernos, renuentes a dejar que las fuerzas del mercado



FIGURA 21.2

Un monocultivo de girasol para la producción de aceite en Andalucía, España. La prioridad por cultivos comerciales específicos en vez de cultivos diversos y locales, ha alterado considerablemente el paisaje agrícola en muchos lugares del mundo.

pongan precio a los alimentos, emplean regulaciones de precios y subsidios que crean varios incentivos y desincentivos, que no necesariamente están en la línea de las prácticas agroecológicas. La irrigación, los proyectos de reclamo, las políticas de importación y exportación, y los programas de investigación agrícola afectan -directa o indirectamente- a la agricultura y están basadas generalmente en ganancias económicas a corto plazo. En países en desarrollo los intereses gubernamentales sobre la seguridad alimentaria, la balanza comercial, el desarrollo de mercados de exportación y la atracción de las inversiones extranjeras, pueden tener como resultado políticas con impacto directo sobre los agricultores y su capacidad para continuar produciendo alimentos sosteniblemente.

Un problema básico de la economía de mercado, es que crea un contexto en el cual la visión a corto plazo no permite vislumbrar el largo plazo. Aún cuando hay acuerdo en considerar que las necesidades a largo plazo son importantes, la realidad económica dicta metas de corto plazo -las ganancias anuales, las cuotas de producción del próximo año- a las que da prioridad. La sostenibilidad en contraste,

requiere que la planeación y la toma de decisiones se den con más tiempo del que considera la mayoría de los programas económicos. Los impactos ambientales de las prácticas y políticas actuales se manifestarán totalmente sólo después de varios decenios; igualmente, la restauración de los ecosistemas dañados y la recuperación de la tierra agrícola improductiva y degradada requerirá de decenios sino es que de centurias.

Otro aspecto problemático de las fuerzas en la economía de mercado, es que los efectos negativos de la actividad económica sobre el ambiente, sobre la salud de la población y sobre la subsistencia de ésta, son puestas en paréntesis como "externalidades". No son contabilizadas como costos en el cálculo económico agrícola y de esta manera son desdeñados.

Si a largo plazo la agricultura va a continuar como una actividad económica, el contexto económico en el cual se realiza debe tener un cambio fundamental. Debemos reconocer primero que una economía sana depende en última instancia, de la salud del ambiente, que la producción agrícola tiene un fundamento ecológico que puede ser destruida-. Entonces podremos tener una economía de sostenibilidad, que premie las prácticas ecológicas en el mercado y valore los procesos naturales del ecosistema que contribuyen a la producción agrícola.

Bajo el criterio de la sostenibilidad, las consecuencias a largo plazo son importantes más que las ganancias a corto plazo y nada es considerado una externalidad. Los recursos naturales, usualmente explotados por la agricultura, son tratados como bienes sociales finitos. Los ingresos llevan un precio de compra que está basado no sólo en los costos de su producción, distribución y aplicación, sino también en los costos ambientales y sociales. Las políticas alimentarias gubernamentales están basadas tanto en su contribución a la sostenibilidad, como en su habilidad para reducir los precios de alimentos.



FIGURA 21.3

Escogencia del consumidor en el mercado. Con una conciencia sobre el impacto que su escogencia tiene sobre el ambiente y la economía de la producción agrícola, los consumidores pueden ayudar a la transición hacia la sostenibilidad.

Más Allá de los Supuestos Tecnológicos

Parte de la razón por la cual es fácil para la gente ignorar el marco de largo plazo y las futuras consecuencias de nuestras acciones, es que mantenemos una permanente fe en la tecnología. Confiamos en que el progreso en la tecnología solucionará nuestros problemas. En agricultura el mejor ejemplo de nuestra crédula fe es la Revolución Verde. Mediante el desarrollo de variedades de plantas más productivas, los científicos de la Revolución Verde "solucionaron" el problema de producir alimentos para una población mundial con rápido crecimiento demográfico. Sin embargo, en este proceso ellos crearon y exacerbaron un hospedante de otros problemas, incluyendo la dependencia de fertilizantes que requieren un uso intensivo de energía, la contaminación con plaguicidas y la más rápida degradación del recurso suelo alrededor del mundo. Aún más, los problemas subyacentes —rápido crecimiento demográfico y sus causas sociales, distribución desigual de alimentos y recursos agrícolas— fueron ocultados en vez de enfrentados.

Este ejemplo muestra que la tecnología puede ayudar a solucionar un problema, pero nunca puede ser la solución total. Problemas sociales como la sostenibilidad de nuestros sistemas alimenticios, siempre tienen causas más profundas que las que fueron enfrentadas por la innovación tecnológica exclusivamente.

Actualmente, la biotecnología está siendo considerada como la salvadora de los problemas de la agricultura. No podemos dejar que sus promesas tomen la forma de esfuerzos para transformar la agricultura en maneras que encaren las causas subyacentes de la falta de sostenibilidad.

Más Allá de la Sostenibilidad Ecológica

Aunque podemos definir la sostenibilidad principalmente en términos ecológicos, es cierto que la sostenibilidad ecológica no puede darse en un contexto social y económico que no pueda mantenerla. Aún cuando los agroecosistemas funcionan ecológicamente, son manipulados en gran medida por los humanos. Como consecuencia, las características ecológicas de un agroecosistema están íntimamente relacionados con los sistemas sociales y económicos. Algunas de estas relaciones, como la influencia de las fuerzas económicas sobre la agricultura, ya se han discutido.

Reconociendo la influencia de los factores sociales, económicos, culturales y políticos sobre la agricultura, podemos cambiar eventualmente nuestro enfoque de la sostenibilidad, de los agroecosistemas a la sostenibilidad de nuestros sistemas alimenticios. Los sistemas alimenticios tienen amplitud global y comprenden todos los aspectos de la producción de

alimentos, distribución y consumo. Incluyen las relaciones económicas entre propietarios de la tierra y trabajadores agrícolas, agricultores y consumidores, ciudadanos de países desarrollados, sistemas políticos que controlan esas relaciones, estructuras sociales que influyen en cómo la gente se relaciona con la producción de alimentos y el consumo; y los sistemas culturales que influyen en lo que la gente cree y valora. Para que la producción de alimentos sea sostenible, todos los aspectos humanos deben mantener la sostenibilidad de los aspectos ecológicos.

HACIA SISTEMAS ALIMENTICIOS SOSTENIBLES

Mucha de la discusión reciente en la comunidad de investigadores en agroecología, se ha centrado en llegar a una definición de sostenibilidad, suficientemente amplia para incluir en ella a todas las fuerzas del sistema global alimenticio (Brown *et al.* 1987, Allen *et al.* 1991, Gliessman 1990b, Farshad y Zinck 1993, Stauber 1994). El Centro de Agroecología de la Universidad de California en Santa Cruz ha desarrollado la siguiente definición: *Una agricultura sosteni-*

ble es aquella que reconoce en su totalidad el sistema alimenticio, nutrición animal y producción de fibra en un balance equitativo de lo concerniente al ambiente de solidez, igualdad social y viabilidad económica entre todos los sectores del público, incluyendo la población internacional e intergeneracional. Inherente a esta definición está la idea de que la sostenibilidad agrícola no tiene límites en espacio o tiempo –incluye a todas las naciones del globo y a todos los organismos vivientes y se extiende hacia el futuro indefinidamente.

Trabajar con esta definición significa la conceptualización de las interconexiones e interacciones entre los componentes ecológicos y sociales del ecosistema. El diagrama en la Figura 21.4 nos ofrece un punto de partida para esto. Como se muestra en el diagrama cada ecosistema se desarrolla en el contexto y se dibuja sobre un fundamento social y ecológico. Este fundamento posee un contexto natural ecosistémico –que puede ser llamado el antecedente ecológico- y un contexto social –que puede ser llamado el antecedente social-. Cualquier agroecosistema específico está moldeado por factores locales, regionales y globales desde ambas partes de su fundamento: las sociales y las ecológicas. Los humanos pueden manipular y manejar muchas características de las partes ecológicas del fundamento, pero el agroecosistema que se desarrolla opera dentro del contexto del fundamento social sobre la cual se basa cada cultura. Como el cambio ocurre en cualquiera de los fundamentos, social o ecológico, la etapa es puesta para cambios en el agroecosistema que emergen de ese fundamento.

Un agroecosistema sostenible se desarrolla cuando los componentes de ambos fundamentos, social y ecológico (Cuadro 21.1) están combinados en un sistema con una estructura y función que refleja la interacción del conocimiento humano y las preferencias con los componentes del agroecosistema. La interacción constante entre los componentes sociales y ecológicos se da como técnicas de manejo, prácticas y las estrategias de cambio. La natura-

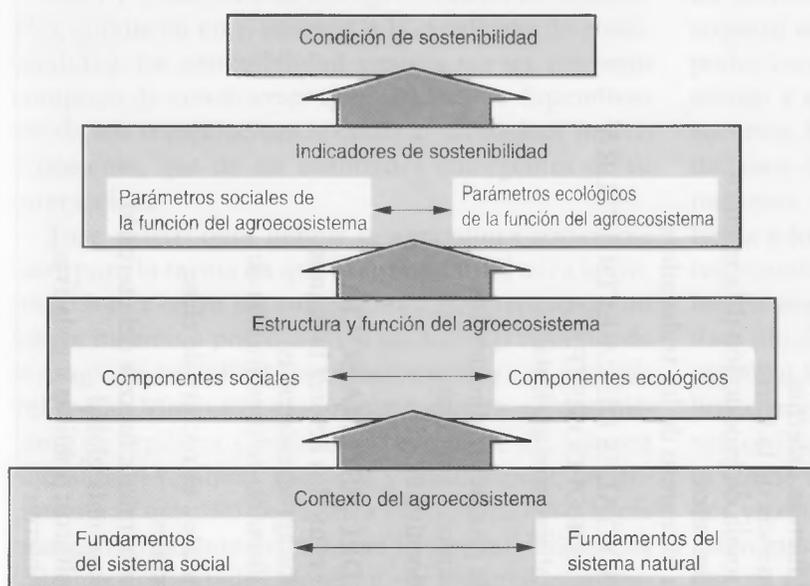


FIGURA 21.4

La interacción entre los componentes sociales y ecológicos de los agroecosistemas sostenibles. Aplicado a conjuntos de agroecosistemas interconectados, este modelo puede representar la estructura integrada de un sistema alimenticio sostenible.

CUADRO 21.1 Algunos aspectos importantes de los sistemas sociales y ecológicos que interactúan en cada nivel de los sistemas alimenticios

El sistema social	El sistema ecológico
<p>CONDICIONES SOCIALES DE SOSTENIBILIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> • equidad • calidad de vida • satisfacción • eficiencia • estabilidad cultural 	<p>CONDICIONES ECOLÓGICAS DE SOSTENIBILIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> • estabilidad • rechazo • eficiencia • salud • permanencia
<p>PARÁMETROS SOCIALES DE LA FUNCIÓN DEL AGROECOSISTEMA</p> <ul style="list-style-type: none"> • dependencia de fuerzas externas • relaciones de tenencia de la tierra • papel en la economía de producción de alimentos • calidad de los alimentos • participación en el regreso de los trabajadores 	<p>PARÁMETROS ECOLÓGICOS DE LA FUNCIÓN DEL AGROECOSISTEMA</p> <ul style="list-style-type: none"> • diversidad biótica • fertilidad y estructura del suelo • disponibilidad de humedad • tasas de erosión • tasas de reciclaje de nutrimentos
<p>COMPONENTES SOCIALES DE LA ESTRUCTURA Y FUNCIÓN DEL AGROECOSISTEMA</p> <ul style="list-style-type: none"> • agricultores y trabajadores agrícolas • propietarios • consumidores de productos alimenticios • conocimiento técnico y práctico • conocimiento ecocultural 	<p>COMPONENTES ECOLÓGICOS DE LA ESTRUCTURA Y FUNCIÓN DEL AGROECOSISTEMA</p> <ul style="list-style-type: none"> • cultivo de plantas y sus genomas • organismos no cultivos • calidad del suelo • ciclo de nutrimentos • interacciones bióticas
<p>FUNDAMENTOS DEL SISTEMA SOCIAL Formas y fuerzas de cómo los actores humanos diseñan y manejan los agroecosistemas</p> <ul style="list-style-type: none"> • componentes culturales: valores, formas de vida, lenguaje • componentes sociales: estructura de clase, instituciones sociales • componentes económicos: fuerzas del mercado, posición en la economía global • componentes políticos: políticas legislativas, estructura de gobierno 	<p>FUNDAMENTOS DEL SISTEMA NATURAL Provee las materias primas para el contexto físico de los agroecosistemas</p> <ul style="list-style-type: none"> • componentes locales: suelo, microorganismos del suelo, flora nativa y fauna, relaciones ecológicas, temperatura y clima, topografía • componentes globales: ciclos biogeoquímicos, radiación solar, patrones climáticos

leza dinámica de los agroecosistemas coloca la etapa en un constante juego interno entre la organización y el funcionamiento de la granja y la organización e interacción de los componentes sociales, económicos y culturales de la sociedad dentro de la cual está inmersa la granja.

En el tiempo, parámetros específicos (elementos o propiedades) pueden ser medidos como indicadores de sostenibilidad. Los parámetros ecológicos medibles han sido descritos en este libro; los parámetros sociales de la función sostenible del agroecosistema son aún más difíciles de identificar y medir. Los parámetros de medición más útiles y fáciles, indudablemente variarán con el tiempo, especialmente cambia el conocimiento y las preferencias, los elementos ambientales se desarrollan y maduran y los procesos interactivos de rechazo y resistencia, se combinan para guiar la tasa y dirección de este cambio. Uno de nuestros mayores retos es aprender cómo monitorear los impactos de un indicador sobre otro, cómo interactúan los parámetros sociales y ecológicos, también cómo encontrar los caminos que unen a los indicadores en una relación funcional o causal.

Finalmente, la interacción entre los componentes sociales y ecológicos de los agroecosistemas sostenibles, conducen en si mismos a la condición de sostenibilidad. La sostenibilidad viene a ser un conjunto complejo de condiciones que, son menos dependientes de los componentes sociales o ecológicos individualmente, que de las cualidades emergentes de su interacción.

Este marco para definir la agricultura sostenible incorpora la forma en que el sistema total mira las interacciones entre los subsistemas. El impacto de un nuevo insumo o práctica en el sistema agrícola puede ser seguido más allá de sus efectos ecológicos en el nivel social. Mirando cada granja como un agroecosistema en si misma y entonces, como parte del sistema alimenticio regional, nacional y transnacional, podremos mirar más allá de la línea económica base, hacia nuevas formas que promuevan la sostenibilidad. Los sistemas alimenticios vienen a ser sistemas con fundamento ecológico, que también mantienen las necesidades sociales de la seguridad alimentaria, la equidad social y la calidad de vida que la sostenibilidad tanto produce como requiere.

Factores Sociales Claves en el Sistema Alimenticio

Los cambios en las estructuras y relaciones involucradas en la producción, distribución y consumo de alimentos, pueden ser discutidos por si mismos desde razones morales. Las desigualdades se presentan en todos los niveles del sistema alimenticio y tienen un efecto dramático que afecta la vida de las personas. Pero también es posible argumentar que ciertas condiciones sociales y relaciones son incompatibles con la sostenibilidad agrícola. Los componentes actuales del sistema mundial alimenticio trabajan concertadamente con prácticas insostenibles y degradantes de los recursos. Para soportar prácticas sostenibles de conservación de recursos se requiere el establecimiento de un conjunto de componentes sociales y de relaciones organizadas en una forma diferente. El desarrollo completo de este tipo de argumento requiere de un libro, pero aquí presentaremos algunos de los temas más importantes que están involucrados.

Equidad

La sostenibilidad de los sistemas alimenticios puede requerir mayor equidad entre la gente en términos de poder económico, propiedad y control de la tierra, y acceso y control del conocimiento agrícola y de los recursos. Hoy la falta de equidad existe entre los ciudadanos de los países en desarrollo y aquellos de las naciones desarrolladas, entre aquellos que poseen tierra y los que no, entre aquellos que pasan su vida trabajando y los que poseen grandes capitales agrícolas. Es importante reconocer cómo esta falta de equidad puede afectar la forma en que se diseñan y manejan los agroecosistemas. ¿En qué medida aquellos que poseen un poder relativamente grande, se ven obligados a asegurarse que la producción agrícola sea de tal forma que les permitan mantener su poder y control? ¿Cómo la falta de equidad hace que estén más preocupados en lograr mayores ganancias que en cuidar la tierra? ¿Es la inseguridad económica de los agricultores en países en desarrollo la causa de que estén más preocupados de la supervivencia a corto plazo y de aumentar su economía que de la conservación y prácticas agrícolas ambientales?



FIGURA 21.5
Cosecha de lechuga para mercados distantes, Watsonville, California, EE.UU. La sostenibilidad requiere que toda la gente comparta equitativamente los bienes del sistema alimenticio.

Patrones Alimenticios Sostenibles

La modernización y el desarrollo en todo el mundo están causando una transformación progresiva de los patrones alimenticios y del consumo de alimentos. En todo el mundo la gente está consumiendo más productos animales, más comida alta en grasas y más vegetales y frutas. Debido a que estos productos agrícolas altos en proteínas y grasas son más costosos de producir —en términos de uso de energía, impacto ambiental y requerimientos de tierra— que los granos básicos, debemos analizar cuidadosamente cómo estas tendencias actuales de la dieta mundial pueden ser problemas exacerbantes de los problemas de producción y abastecimiento. La sociedad puede enfrentar elecciones muy difíciles si fallamos en evaluar críticamente los impactos de la dieta humana, sobre los fundamentos ecológicos del planeta y nuestra capacidad para alimentar la creciente población.

Control del Crecimiento de la Población

Subyacente al problema de que cada vez hay más gente consumiendo una dieta más rica, está el problema del crecimiento de la población. Expertos de varias disciplinas están en desacuerdo sobre cuál es la "capacidad de carga" humana que tiene la Tierra; pe-

ro pocos niegan que el rápido crecimiento de la población humana hace cada vez más difícil que simultáneamente se pueda alimentar la población, y proteger los recursos agrícolas y la integridad del ambiente natural. Por consiguiente, cualquier esfuerzo coordinado para desarrollar sistemas alimenticios sostenibles, deben enfrentar el problema de cómo controlar mejor el crecimiento de la población mundial.

Autosuficiencia y Bioregionalismo

Los sistemas alimenticios en todo el mundo están siendo incorporados rápidamente al sistema alimenticio masivo y global. Aunque esta tendencia tiene muchos beneficios, también tiene consecuencias negativas para la sostenibilidad agrícola. Un problema serio es que la producción y distribución global de alimentos requiere de grandes cantidades de energía para su transporte. Más significativo, quizá, es que el sistema global alimenticio puede ayudar a crear las condiciones ideales para la exacerbación del problema de inequidad y puede erosionar los agroecosistemas tradicionales en todo el mundo.

En un sistema alimenticio global, los productores de insumos como las semillas, fertilizantes, plaguicidas y maquinaria, pueden expandir su influencia so-



FIGURA 21.6

Haciendo tortillas en Tlaxcala, México. Las dietas locales, la cultura local y la agricultura local, están estrechamente relacionadas en los sistemas alimenticios sostenibles.

bre los agroecosistemas y los agricultores se vuelven cada vez más dependientes de ellos y de sus productos y conocimiento. La tierra agrícola se vuelve más valiosa por su capacidad para producir alimentos para exportar, que para las necesidades locales. El trabajo humano está siendo reemplazado, cada vez más por la mecanización. Finalmente, las consecuencias son una mayor integración de los agroecosistemas a una agricultura convencional, basada en la tecnología y los insumos, menos autonomía, una decreciente capacidad para sembrar alimento para las necesidades locales y una destrucción de las comunidades tradicionales y agrícolas.

Pero la globalización también tiene el potencial de contrarrestar estos efectos, si en lugar de ello es usa-

da para promover y mantener el control local de la tierra, el uso del conocimiento local, el involucramiento humano directo en la producción agrícola y la independencia económica. Estos aspectos importantes del manejo ecológico de la granja pueden ser claves en el diseño de un futuro sostenible.

Relaciones entre la Agroecología y los Cambios en el Contexto Social de la Agricultura

Aún cuando la ciencia de la agroecología está basada en los aspectos ecológicos de los agroecosistemas, los principios que pretende aplicarse pueden fomentar cambios positivos en los aspectos sociales y también en el contexto de los agroecosistemas. La confianza en los procesos ecológicos internos para el mantenimiento de la fertilidad y el manejo de las plagas, implica relaciones sociales y estructuras muy diferentes de aquellas que las que se tienen con un uso extensivo de insumos externos.

- La reducción drástica en insumos externos para el manejo agroecológico, disminuye la dependencia del sistema de fuerzas económicas externas y lo hace menos vulnerable a los incrementos en el precio de los insumos. El agricultor puede beneficiarse económicamente y simultáneamente mejorar el bienestar agroecológico del sistema.
- Los principios agroecológicos requieren que el manejo esté basado tanto en el conocimiento práctico del trabajo en el campo como del conocimiento teórico. Este requerimiento valoriza el conocimiento práctico de los agricultores y de los trabajadores agrícolas, dándoles mayor poder en demanda de un tratamiento equitativo.
- El enfoque agroecológico sobre el conocimiento de las condiciones locales, los ecosistemas locales y los cultivos localmente adaptados, fomenta un enfoque biorregional de la agricultura y de aquellos que poseen y trabajan la tierra más que una apuesta personal en la integridad ecológica a largo plazo del agroecosistema.
- El manejo agroecológico le propone al agricultor que tenga un punto de vista a largo plazo, que equilibre la necesidad de priorizar la producción anual y las ganancias.
- Los principios agroecológicos son mejor aplicados en una escala relativamente pequeña. Esto fomenta la producción para consumo regional en lugar

de la exportación; es también más consistente con la distribución justa de la tierra y los beneficios económicos, que con la concentración de tierra arable en las manos de unos pocos.

- La agroecología reconoce el valor de los sistemas tradicionales que han demostrado ser estables tanto en términos ecológicos como sociales, y así mantienen las estructuras y comunidades que hacen posible su existencia en cuanto a condiciones sociales y económicas.
- El manejo agroecológico se logra mejor mediante la intensificación del trabajo humano más que la del uso de maquinaria. Como el trabajo requiere de mucho conocimiento, juicio y destreza tecnológica, las granjas manejadas agroecológicamente pueden proveer a mucha gente de formas de vida dignas y satisfactorias.

Las relaciones arriba descritas demuestran que los cambios en las prácticas agrícolas y las técnicas van de la mano con los cambios en el contexto total de la agricultura. Ninguna puede lograrse completamente en forma independiente de la otra y la agroecología tiene una función en ambas.

Logrando el Cambio

Los problemas en la agricultura crean presiones por cambios que puedan mantener una agricultura sostenible. Pero una cosa es la necesidad de expresar la sostenibilidad y otra llevarla hasta los cambios que son requeridos.

En parte, el cambio puede ocurrir en las instituciones de investigaciones agrícolas y en otros sitios involucrados en expandir el conocimiento agrícola. Para hacer la agricultura sostenible necesitamos analizar los impactos inmediatos y futuros de ésta, de tal manera que podamos identificar los puntos clave en el sistema, sobre los cuales enfocar la investigación para dar alternativas o soluciones a los problemas. Debemos aprender a usar más la perspicacia en nuestro análisis, para evitar problemas o cambios negativos antes que puedan ocurrir. Nuestra habilidad para resolver los problemas que enfrenta la agricultura actualmente es extremadamente limitada. Comprendiendo los procesos ecológicos en la agricultura sostenible y estable-

ciendo una base científica para la transición a alternativas, podemos entrar a una nueva era de investigación científica.

Los cambios también pueden ocurrir en las bases. Agricultores haciendo la transición a prácticas más sostenibles; agricultores en las comunidades agrícolas más tradicionales de países en desarrollo, luchando por conservar sus formas de vida están forzando cambios en la agricultura. Con mas ejemplos de una agricultura sostenible y viable económicamente, las mayores posibilidades de que nuestros sistemas de producción de alimentos sigan este camino. Cada granja en el sistema alimenticio puede ser un punto focal para cambiar la manera de cómo hacemos la agricultura, pero ese cambio debe darse también en el sistema global en el cual se aplica la agricultura actualmente.

Además de todo debemos recordar que los sistemas agrícolas son resultado de la coevolución que ocurre entre cultura y ambiente, y que los humanos tenemos la capacidad de dirigir esa coevolución. Una agricultura sostenible valora a los humanos tanto como a los componentes ecológicos de la producción de alimentos y reconoce sus relaciones e interdependencias.

Ideas para Meditar

1. "Para que realmente se alcance la sostenibilidad de la agricultura, debemos poner a la cultura detrás de la agricultura". ¿Qué significa esta afirmación?
2. ¿Cómo cambian los componentes ecológicos y sociales a medida que expandemos la escala de análisis desde la granja, a la comunidad local, a la región, a la nación y por último al planeta entero?
3. ¿Cómo es que la gran cantidad de programas que mantienen las políticas económicas y de precios -originalmente diseñadas para ayudar a la agricultura- impiden el desarrollo de la agricultura sostenible?
4. ¿Cuál es su visión de un agroecosistema que puede integrar todos los componentes de la sostenibilidad que hemos discutido?
5. ¿Cuáles son los cambios más significativos que tienen que ocurrir en las actitudes humanas hacia la agricultura y el sistema alimenticio para lograr su sostenibilidad?

Lecturas Recomendadas

Allen, P.A. (ed.). 1993. *Food for the Future: Conditions and Contradictions of Sustainability*. John Wiley and Sons: New York.

Una reseña crítica de los aspectos sociales, económicos y políticos del concepto de sostenibilidad, los cuales muchas veces se descuidan en la búsqueda de formas de incrementar la producción.

Berry, W. 1977. *The Unsettling of America: Culture and Agriculture*. Sierra Club Books: San Francisco.

Una historia de la pérdida de granjas y comunidades rurales, y los impactos culturales de esta pérdida.

Brown, L. et al. 1984-1997. *State of the World*. W.W. Norton: New York.

Informes anuales del Worldwatch Institute de las amenazas para el ambiente y su capacidad para mantener la vida, así como recomendaciones y estrategias para el cambio.

Daly, H.E. y J.B. Cobb, Jr. 1989. *For the Common Good: Redirecting the Economy Toward Community, the Environment, and a Sustainable Future*. Beacon Press: Boston, MA.

Una propuesta alcanzable y realista que relaciona la economía con la sostenibilidad.

Edwards, C.A., M.K. Wali, D.J. Horn, y F. Miller. (eds.) 1993. Agriculture and the Environment. Special Issue. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*. 46: 1-325.

Una variedad impresionante de trabajos presentados

por gran cantidad de expertos en varias disciplinas sobre temas relacionados con la sostenibilidad de la agricultura y del ambiente.

Francis, C.A., L.B. Flora, y L.D. King (eds.) 1990. *Sustainable Agriculture in Temperate Zones*. John Wiley and Sons: New York.

Una colección excelente sobre sistemas agrícolas sostenibles y los enfoques más apropiados para la agricultura de áreas templadas en los Estados Unidos.

Redclift, M. 1987. *Sustainable Development: Exploring the Contradictions*. Methuen: London.

Un análisis de la transformación que ocurre en el ambiente durante el proceso de desarrollo, y por qué se necesita una perspectiva amplia de economía política para redirigir el desarrollo hacia las necesidades tanto de la población como del ambiente.

Reijntjes, C., B. Haverkort, y A. Waters-Bayer. 1992. *Farming for the Future: An Introduction to Low-External-Input and Sustainable Agriculture*. McMillan Press Limited: London.

Un enfoque interdisciplinario para lograr una agricultura sostenible en países en desarrollo; combina teoría y práctica en la búsqueda de estrategias específicas para la región y amigables al productor, que aumentan y mantengan la productividad utilizando recursos locales de bajo costo.

Strange, M. 1989. *Family Farming: A New Economic Vision*. University of Nebraska Press: Lincoln, NE. Una visión para alcanzar unidades agrícolas familiares saludables y sostenibles.

REFERENCIAS

- Alcorn, J. B. 1991. Ethics, economics, and conservation. In M. L. Oldfield and J. B. Alcorn (eds.), *Biodiversity: Culture, Conservation, and Ecodevelopment*. pp. 317-349. Westview Press: Boulder, CO.
- Allen, P., and D. V. Dusen. 1988. Sustainable agriculture: choosing the future. In P. Allen and D. V. Dusen (eds.), *Global Perspectives on Agroecology and Sustainable Agricultural Systems*. vol. 1, pp. 1-13. University of California: Santa Cruz, CA.
- Allen, P., D. V. Dusen, J. Lundy, and S. R. Gliessman. 1991. Integrating social, environmental, and economic issues in sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*. 6:34-39.
- Allison, J. 1983. An ecological analysis of home gardens (*huertos familiares*) in two Mexican villages. M.A. Thesis, Univ. of Calif., Santa Cruz.
- Altieri, M. A. 1983. *Agroecology*. University of California Press: Berkeley.
- Altieri, M. A. 1987. *Agroecology: The Scientific Basis of Alternative Agriculture*. Westview Press: Boulder, CO.
- Altieri, M. A. 1990. Why study traditional agriculture? In C. R. Carroll, J. H. Vandermeer, and P. M. Rosset (eds.), *Agroecology*. pp. 551-564. McGraw-Hill: New York.
- Altieri, M. A. 1994a. *Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems*. Food Products Press: New York.
- Altieri, M. A. 1994b. The influence of adjacent habitats on insect populations in crop fields. In M. A. Altieri, *Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems*. pp. 109-129. Food Products Press: New York.
- Altieri, M. A. 1995a. Cover cropping and mulching. In M. A. Altieri, *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. 2nd ed, pp. 219-232. Westview Press: Boulder, CO.
- Altieri, M. A. 1995b. *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. 2nd ed. Westview Press: Boulder, CO.
- Altieri, M. A., and C. Montecinos. 1993. Conserving crop genetic resources in Latin America through farmers' participation. In C. S. Potter, J. I. Cohen, and D. Janczewski (eds.), *Perspectives on Biodiversity: Case Studies of Genetic Resource Conservation and Development*. pp. 45-64. American Association for the Advancement of Science Press: Washington, D.C.
- Altieri, M. A., and L. C. Merrick. 1987. *In situ* conservation of crop genetic resources through maintenance of traditional farming systems. *Economic Botany*. 41:86-96.
- Altieri, M. A., and M. K. Anderson. 1986. An ecological basis for the development of alternative agricultural systems for small farmers in the Third World. *American Journal of Alternative Agriculture*. 1(1):30-38.
- Altieri, M. A., and Whitcomb. 1979. The potential use of weeds in the manipulation of beneficial insects. *Horticultural Science*. 14:12-18.
- Altieri, M. A., M. K. Anderson, and L. C. Merrick. 1987. Peasant agriculture and the conservation of crop and wild plant resources. *Conservation Biology*. 1:49-58.
- Amador, M. F. 1980. *Comportamiento de tres especies (Maiz, Frijol, Calabaza) en policultivos en la Chontalpa, Tabasco, Mexico*. Tesis Profesional, CSAT, Cardenas, Tabasco, Mexico.
- Amador, M. F., and S. R. Gliessman. 1990. An ecological approach to reducing external inputs through the use of intercropping. In S. R. Gliessman (ed.), *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. pp. 146-159. Springer-Verlag: New York.
- American Farmland Trust. 1995. *Alternatives for Future Urban Growth in California's Central Valley: The Bottom Line for Agriculture and Taxpayers*. Summary Report. American Farmland Trust.
- Anaya, A. L., L. Ramos, R. Cruz, J. G. Hernandez, and V. Nava. 1987. Perspectives on allelopathy in Mexican traditional agroecosystems: A case study in Tlaxcala. *Journal of Chemical Ecology*. 13:2083-2102.

- Andow, D. A. 1991. Vegetational diversity and arthropod population responses. *Annual Review of Entomology*. 36: 561-586.
- Aoki, M., A. Gilbert, A. Hull, M. Karlberg, and M. MacDonald. 1989. Multi-variable ecological analysis in a broccoli-lettuce intercrop. Unpublished data compiled for Environmental Studies 130. University of California, Santa Cruz.
- Armstrong, W. 1982. Waterlogged soils. In J. R. Etherington (ed.), *Environment and Plant Ecology*. 2nd ed., pp. 290-330. Wiley and Sons: New York.
- Azzi, G. 1956. *Agricultural Ecology*. Constable Press: London.
- Baldwin, C. S. 1988. The influence of field windbreaks on vegetable and specialty crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 22/23:191-203.
- Baldwin, C. S., and Johnston. 1984. *Windbreaks on the Farm*. Report # 527. Publications of the Ontario Ministry of Agriculture and Food Provision: Ontario, Canada.
- Barnes, J. P., A. R. Putnam, and B. A. Burke. 1986. Allelopathic activity of rye (*Secale cereale* L.). In A. R. Putnam and C. S. Tang (eds.), *The Science of Allelopathy*. pp. 271-286. John Wiley and Sons: New York.
- Barret, G. W., N. Rodenhouse, and P. J. Bohlen. 1990. Role of sustainable agriculture in rural landscapes. In C. A. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. H. Miller, and G. House (eds.), *Sustainable Agricultural Systems*. pp. 624-636. Soil and Water Conservation Society: Ankeny, Iowa.
- Bazzaz, F. 1975. Plant species diversity in old field successional ecosystems in southern Illinois. *Ecology*. 56:485-488.
- Beets, W. C. 1982. *Multiple Cropping and Tropical Farming Systems*. Westview Press: Boulder, CO.
- Bethlenfalvay, G. J., M. G. Reyes-Solis, S. B. Camel, and R. Ferrera-Cerrato. 1991. Nutrient transfer between the root zones of soybean and maize plants connected by a common mycorrhizal inoculum. *Physiologia Plantarum*. 82:423-432.
- Bilbro, J. D., and D. W. Fryrear. 1988. Annual herbaceous windbarriers for protecting crops and soils and managing snowfall. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 22/23:149-161.
- Billings, W. D. 1952. The environmental complex in relation to plant growth and distribution. *Quarterly Review of Biology*. 27:251-265.
- Blank, S. C., K. Jetter, C. M. Wick, and J. F. Williams. 1993. Incorporating rice straw into soil may become disposal option for farmers. *California Agriculture*. 47:8-12.
- Boucher, D. H. 1985. The idea of mutualism, past and future. In D. H. Boucher (ed.), *The Biology of Mutualism*. pp. 1-28. Oxford University Press: New York.
- Boucher, D., and J. Espinosa. 1982. Cropping systems and growth and nodulation responses of beans to nitrogen in Tabasco, Mexico. *Tropical Agriculture*. 59:279-282.
- Brady, N. C., and R. R. Weil. 1996. *The Nature and Properties of Soils*. 11th ed. Prentice Hall: Upper Saddle River, New Jersey.
- Brengel, K. G. 1982. *Principles and Practices of Dryland Farming*. Colorado Associated University Press: Boulder, Colorado.
- Brown, B. J., M. H. Hanson, D. M. Liverman, and J. R. W. Merideth. 1987. Global sustainability: towards definition. *Environmental Management*. 11:713-719.
- Brown, L. 1997. Facing the prospect of food scarcity. In L. Starke (ed.), *State of the World, 1997*. pp. 23-41. W. W. Norton & Co.: New York.
- Brown, M. 1992. Agriculture and wetlands study initiated. *Cultivar*. 10:1-3.
- Budowski, G. 1985. Homegardens in tropical America: a review. Presented at the First International Workshop on Tropical Homegardens, Bandung, Indonesia.
- Buttel, F. H. 1993. The sociology of agricultural sustainability: some observations on the future of sustainable agriculture. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*. 46: 175-186.
- Buttel, F. H., and J. Curry. 1992. The structuring of sustainable agriculture in public research institutions: results from a national survey of land-grant agricultural scientists. *Impact Assessment Bulletin*. 10:7-26.
- Carlquist, S. 1965. *Island Life*. The Natural History Press: Garden City, New York.
- Chacón, J. C., and S. R. Gliessman. 1982. Use of the "non-weed" concept in traditional tropical agroecosystems of south-eastern Mexico. *Agro-Ecosystems*. 8:1-11.
- Chang, T. T. 1984. Conservation of rice genetic diversity: luxury or necessity? *Science*. 224:251-256.

- Chavelas, J. 1979. Multiple soil use module for tropical regions. In G. De Las Salas (ed.), *Proceedings of Workshop on Agroforestry Systems in Latin America*. pp. 79-83. CATIE: Turrialba, Costa Rica.
- Chou, C. H. 1990. The role of allelopathy in agroecosystems: studies from tropical Taiwan. In S. R. Gliessman (ed.), *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. pp. 104-121. Springer Verlag: New York.
- Christanty, L. 1986. Shifting cultivation and tropical soils: Patterns, problems, and possible improvements. In G. G. Marten (ed.), *Traditional Agriculture in Southeast Asia: A Human Ecology Perspective*. pp. 226-240. Westview Press: Boulder, Colorado.
- Christanty, L., O. Abdoellah, G. Marten, and J. Iskander. 1986. Traditional agroforestry in west Java: the pekarangan (homegarden) and kebun-talun (annual perennial rotation) cropping systems. In G. Marten (ed.), *Traditional Agriculture in Southeast Asia*. pp. 132-156. Westview Press: Boulder, Colorado.
- Colwell, R., and D. Futuyma. 1971. On the measurement of niche breadth and overlap. *Ecology*. 52:567-576.
- Connell, J. H. 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*. 199:1302-1310.
- Connell, J. H., and R. O. Slayter. 1977. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *American Naturalist*. 111:1119-1144.
- Conway, G. R. 1985. Agroecosystem analysis. *Agricultural Administration*. 20:31-55.
- Conway, M., and L. Liston (ed.). 1990. *The Weather Handbook*. Conway Data: Atlanta.
- Cosgrove, D. J. 1977. Microbial transformations in the phosphorus cycle. *Advances in Microbial Ecology*. 1:95-134.
- Cox, G. W., and M. D. Atkins. 1979. *Agricultural Ecology*. Freeman: San Francisco.
- Crews, T. E., and S. R. Gliessman. 1991. Raised field agriculture in Tlaxcala, Mexico: An ecosystem perspective on maintenance of soil fertility. *American Journal of Alternative Agriculture*. 6:9-16.
- Davis, J. H. C., J. N. Woolley, and R. A. Moreno. 1986. Multiple cropping with legumes and starchy roots. In C. A. Francis (ed.), *Multiple Cropping Systems*. pp. 133-160. MacMillan: New York.
- Dell, J. D., and F. R. Ward. 1971. Logging residues on Douglas-fir region clearcuts: weights and volumes. Report 115: 1-10. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service.
- den Boer, P. J. 1986. The present status of the competition exclusion principle. *Trends in Ecology and Evolution*. 1:25-28.
- Denevan, W. M., and C. Padoch. 1987. *Swidden-fallow agroforestry in the Peruvian Amazon*. New York Botanical Gardens: Bronx, New York.
- Dewey, K. G. 1979. Agricultural development: impact on diet and nutrition. *Ecology of Food and Nutrition*. 8:247-253.
- Dick, R. P. 1994. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart (eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America Special Publication Number 35, pp. 107-124. Soil Science Society of America: Madison, WI.
- Doering III, O. C. 1977. *An energy-based analysis of alternative production methods and cropping systems in the Corn Belt*. Purdue University, Agricultural Experiment Station.
- Douglas, G. (ed.). 1984. *Agricultural Sustainability in a Changing World Order*. Westview Press: Boulder, CO.
- Edwards, C. A. 1987. The concept of integrated systems in lower input/sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*. 2:148-152.
- Eisenberg, E. 1989. Back to Eden. *The Atlantic*. 264(5).
- Ellis, E., and S. M. Wang. 1997. Sustainable traditional agriculture in the Tai Lake region of China. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*. (in press).
- Elton, C. 1927. *Animal Ecology*. Sidgwick and Jackson: London.
- Espinosa, J. 1984. The allelopathic effects of red root pigweed (*Amaranthus retroflexus*) and lambsquarters (*Chenopodium album*) on growth and nodulation of beans (*Phaseolus vulgaris*). M.A. Thesis, Biology, University of California, Santa Cruz.
- Etherington, J. R. 1995. *Environment and Plant Ecology*. 3rd ed. John Wiley & Sons: New York.
- Evenari, M., D. Koller, L. Shanan, N. Tadmor, and Y. Aharoni. 1961. Ancient agriculture in the Negev. *Science*. 133:979-996.
- Ewel, J. 1986. Designing agricultural ecosystems for the humid tropics. *Annual Review of Ecology and*

- Systematics*. 17:245-271.
- Ewel, J., C. Berish, B. Brown, N. Price, and J. Raich. 1981. Slash and burn impacts on a Costa Rican wet forest site. *Ecology*. 62:816-829.
- Ewel, J., F. Benedict, C. Berish, B. Brown, S. R. Gliessman, M. Amador, R. Bermudez, A. Martinez, R. Miranda, and N. Price. 1982. Leaf area, light transmission, roots and leaf damage in nine tropical plant communities. *Agro-Ecosystems*. 7:305-326.
- Ewert, D., and S. Gliessman. 1972. Regeneration under a tree in the tropical wet forest, Osa Peninsula. Field Problem Report, Tropical Biology Course Book, pp. 306-310. Organization for Tropical Studies.
- Faeth, P. 1993. An economic framework for evaluating agricultural policy and the sustainability of production systems. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*. 46:161-174.
- Farrell, J. 1990. The influence of trees in selected agroecosystems in Mexico. In S. R. Gliessman (ed.), *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. pp. 169-183. Springer-Verlag: New York.
- Farshad, A., and J. A. Zinck. 1993. Seeking agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*. 47:1-12.
- Fearnside, P. M. 1986. *Human Carrying Capacity of the Brazilian Rainforest*. Columbia University Press: New York.
- Flietner, D. 1985. Don Ignacio's home garden. In R. Jaffe and S. R. Gliessman (eds.), *Proceedings of OTS course 85-4*, pp. 57-67. San Jose, Costa Rica.
- Fluck, R. C. (ed.). 1992. *Energy in Farm Production*. vol. 6. Elsevier: Amsterdam.
- Francis, C. A. (ed.). 1986. *Multiple Cropping Systems*. MacMillan: New York.
- Fujiyoshi, P. 1997. Ecological aspects of interference by squash in a corn/squash intercropping agroecosystem. Unpublished data from Ph.D. thesis in Biology, in progress. University of California, Santa Cruz.
- Gardner, G. 1996. Preserving agricultural resources. In L. R. Brown, C. Flavin, and H. French (eds.), *The State of the World, 1996*. pp. 78-93. WorldWatch Institute/W.W. Norton & Co.: New York.
- Gause, G. F. 1934. *The Struggle for Existence*. Williams & Wilkins: Baltimore.
- Giampietro, M., S. G. F. Bukkens, and D. Pimentel. 1994. Models of energy analysis to assess the performance of food systems. *Agricultural Systems*. 45:19-41.
- Gliessman, S. R. 1978a. Sustained yield agriculture in the humid lowland tropics. *INTECOL Newsletter*. 7:1.
- Gliessman, S. R. 1978b. Memorias del Seminario Regional sobre la Agricultura Agricola Tradicional. CSAT, Cardenas, Tabasco, Mexico.
- Gliessman, S. R. 1978c. Unpublished research report. Colegio Superior de Agricultura Tropical.
- Gliessman, S. R. 1978d. The establishment of bracken following fire in tropical habitats. *American Fern Journal*. 68:41-44.
- Gliessman, S. R. 1979. Allelopathy in crop/weed interactions in the humid tropics. In A. Amador (ed.), *Memoirs of Seminar Series of Ecology*. pp. 1-8. Colegio Superior de Agricultura Tropical: Cardenas, Tabasco, Mexico.
- Gliessman, S. R. 1982. Nitrogen cycling in several traditional agroecosystems in the humid tropical lowlands of southeastern Mexico. *Plant and Soil*. 67:105-117.
- Gliessman, S. R. 1983. Allelopathic interactions in crop-weed mixtures: Applications for weed management. *Journal of Chemical Ecology*. 9:991-999.
- Gliessman, S. R. 1984. An agroecological approach to sustainable agriculture. In W. Jackson, W. Berry, and B. Colman (eds.), *Meeting the Expectations of the Land*. pp. 160-171. Northpoint Press: Berkeley.
- Gliessman, S. R. 1986. The ecological element in farm management. In University of California (ed.), *Proceedings of a Conference on Sustainability of California Agriculture*. U.C. Davis.
- Gliessman, S. R. 1987. Species interactions and community ecology in low external-input agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*. 11:160-165.
- Gliessman, S. R. 1988a. Allelopathic effects of crops on weeds. Unpublished manuscript. University of California, Santa Cruz.
- Gliessman, S. R. 1988b. Local resource use systems in the tropics: taking pressure off the forests. In F. Almeida and C. M. Pringle (eds.), *Tropical Rainforests: Diversity and Conservation*. pp. 53-70. California Academy of Sciences: San Francisco.
- Gliessman, S. R. 1989. Allelopathy and agricultural sustainability. In C. H. Chou and G. R. Waller (eds.),

- Phytochemical Ecology: Allelochemicals, Mycotoxins and Insect Pheromones and Allomones*. pp. 69-80. Institute of Botany: Taipei, Taiwan.
- Gliessman, S. R. 1990a. Integrating trees into agriculture: The home garden agroecosystem as an example of agroforestry in the tropics. In S. R. Gliessman (ed.), *Agroecology: Researching the ecological basis for sustainable agriculture*. pp. 160-168. Springer-Verlag: New York.
- Gliessman, S. R. (ed.). 1990b. *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. Springer-Verlag: New York.
- Gliessman, S. R. 1991. Ecological basis of traditional management of wetlands in tropical Mexico: Learning from agroecosystem models. In M. L. Oldfield and J. B. Alcorn (eds.), *Biodiversity: Culture, Conservation, and Ecodevelopment*. Westview Press: San Francisco.
- Gliessman, S. R. 1992a. Agroecology in the tropics: achieving a balance between land use and preservation. *Environmental Management*. 16:681-689.
- Gliessman, S. R. 1992b. Unpublished data. Agroecology Program, University of California.
- Gliessman, S. R. 1995. Sustainable agriculture: An agroecological perspective. In J. S. Andrews and I. C. Tommerup (ed.), *Advances in Plant Pathology*. vol. 11, pp. 45-56.
- Gliessman, S. R., and M. F. Amador. 1980. Ecological aspects of production in traditional agroecosystems in the humid lowland tropics of Mexico. In J. I. Furtado (ed.), *Tropical Ecology and Development*. International Society for Tropical Ecology: Kuala Lumpur, Malaysia.
- Gliessman, S. R., and R. Garcia-Espinosa. 1982. A green manure crop for the lowland tropics. In National Research Council (ed.), *Tropical Legumes: Resources for the Future*. National Academy of Science: Washington, D.C.
- Gliessman, S. R., M. R. Werner, S. Sweezy, E. Caswell, J. Cochran, and F. Rosado-May. 1996. Conversion to organic strawberry management changes ecological processes. *California Agriculture*. 50:24-31.
- Gliessman, S. R., R. Garcia-Espinosa, and M. F. Amador. 1981. The ecological basis for the application of traditional agricultural technology in the management of tropical agroecosystems. *Agro-Ecosystems*. 7:173-185.
- Gomez-Pompa, A., and C. Vasquez-Yanez. 1981. Successional studies of a rain forest in Mexico. In D. C. West, H. H. Shugart, and D. B. Botkin (ed.), *Forest Succession: Concepts and Applications*. pp. 246-266. Springer-Verlag: New York.
- Gonzalez Jacome, A. 1985. Home gardens in Central Mexico. In I. S. Farrington (ed.), *Prehistoric Intensive Agriculture in the Tropics*. BAR: Oxford, England.
- Gonzalez Jacome, A. 1986. Agroecología del Suroeste de Tlaxcala, Historia y Sociedad en Tlaxcala, pp. 201-220. Gobierno del Estado de Tlaxcala: Tlaxcala, Mexico.
- Gregg Jr., W. P. 1991. MAB Biosphere Reserves and conservation of traditional land use systems. In M. L. Oldfield and J. B. Alcorn (eds.), *Biodiversity: Culture, Conservation, and Ecodevelopment*. pp. 274-294. Westview Press: Boulder, CO.
- Grime, J. P. 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *American Naturalist*. 111:1169-1194.
- Grime, J. P., G. Mason, A. V. Curtis, J. Rodman, S. R. Band, M. A. G. Mowforth, A. M. Neal, and S. Shaw. 1981. A comparative study of germination characteristics in a local flora. *Journal of Ecology*. 69:1017-1059.
- Grinnell, J. 1924. Geography and evolution. *Ecology*. 5:225-229.
- Grinnell, J. 1928. Presence and absence of animals. *University of California Chronicles*. 30:429-450.
- Guyot, G. 1989. Les effets aérodynamiques et microclimatiques des brise-vent et des aménagements régionaux. In W. S. Reifsnyder and T. O. Darnhofer (eds.), *Meteorology and Agroforestry*. pp. 485-520. ICRAF: Nairobi.
- Hansen, J. W., and J. W. Jones. 1996. A systems framework for characterizing farm sustainability. *Agricultural Systems*. 51:185-201.
- Hanson, H. C. 1939. Ecology in agriculture. *Ecology*. 20:111-117.
- Harper, J. L. 1974. The need for a focus on agro-ecosystems. *Agroecosystems*. 1:1-12.
- Harper, J. L. 1977. *Population Biology of Plants*. Academic Press: London.
- Hart, R. D. 1979. *Agroecosistemas: Conceptos Basicos*. CIAT: Turrialba, Costa Rica.
- Hart, R. D. 1980. A natural ecosystem analog approach to the design of successional crop systems for tro-

- pical forest environments. *Biotropica*. 12:73-82.
- Hart, R. D. 1984. Agroecosystem determinants. In R. Lowrance, B. R. Stinner, and G. J. House (eds.), *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*. pp. 105-119. John Wiley & Sons: New York.
- Hart, R. D. 1986. Ecological framework for multiple cropping research. In C. A. Francis (ed.), *Multiple Cropping Systems*. pp. 40-56. MacMillan: New York.
- Hendrix, P. F., R. W. Parmilee, D. A. Crossley, D. C. Coleman, E. P. Odum, and P. M. Groffman. 1986. Detritus food webs in conventional and no-tillage agroecosystems. *BioScience*. 36:374-380.
- Hill, S. 1985. Redesigning the food system for sustainability. *Alternatives*. 12:32-36.
- Hisyam, A., M. Anwar, and Suharto. 1979. Social and Cultural Aspects of Homegardens. Presented at the Fifth International Symposium of Tropical Ecology, Kuala Lumpur.
- House, G. J., and B. R. Stinner. 1983. Arthropods in no-tillage soybean agroecosystems: community composition and ecosystem interactions. *Environmental Management*. 7:23-28.
- House, G., B. Stinner, D. C. Crossley Jr., and E. Odum. 1984. Nitrogen cycling in conventional and no-tillage agro-ecosystems: analysis of pathways and processes. *The Journal of Applied Ecology*. 21:991-1012.
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks. Population Studies: Animal Ecology and Demography. Presented at the Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology.
- Ikerd, J. E. 1993. The need for a systems approach to sustainable agriculture. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*. 46:147-160.
- Illic, P. 1989. Plastic tunnels for early vegetable production: Are they for you?, Family Farm Series. pp. 1-12. Small Farm Center, University of California Cooperative Extension: Davis, CA.
- INTECOL. 1976. *Report on an International Programme for Analysis of Agro-Ecosystems*. International Association for Ecology.
- Jackson, W. 1980. *New Roots for Agriculture*. Friends of the Earth: San Francisco.
- Jansen, D. M., J. J. Stoorvogel, and R. A. Schipper. 1995. Using sustainability indicators in agricultural land use analysis: an example from Costa Rica. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 43:61-82.
- Janzen, D. H. 1973. Tropical agroecosystems. *Science*. 182:1212-1219.
- Jordan, C. 1985. *Nutrient Cycling in Tropical Forests*. John Wiley and Sons: New York.
- Kareiva, P. 1996. Contributions of ecology to biological control. *Ecology*. 77:1963-1964.
- Keever, C. 1950. Causes of succession in old fields of the Piedmont, North Carolina. *Ecological Monographs*. 20:229-250.
- Klages, K. H. W. 1928. Crop ecology and ecological crop geography in the agronomic curriculum. *Journal of the American Society of Agronomy*. 20:336-353.
- Klages, K. H. W. 1942. *Ecological Crop Geography*. MacMillan: New York.
- Klee, G. 1980. *World Systems of Traditional Resource Management*. Halstead: New York.
- Koizumi, H., Y. Usami, and M. Satoh. 1992. Energy flow, carbon dynamics, and fertility in three double-cropping agro-ecosystems in Japan. In M. Shiyomi, E. Yano, H. Koizumi, D. A. Andow, and N. Hokyo (eds.), *Ecological Processes in Agro-Ecosystems*. pp. 157-188. National Institute of Agro-Environmental Sciences: Tukuba, Ibaraki, Japan.
- Kort, J. 1988. Benefits of windbreaks to field and forage crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 22/23:165-190.
- Lagemann, J., and J. Heuvelodp. 1982. Characterization and evaluation of agroforestry systems: The case of Acosta-Puriscal, Costa Rica. *Agroforestry Systems*. 1:101-115.
- Laing, D. R., P. G. Jones, and J. H. C. Davis. 1984. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In P. R. Goldsworthy and N. M. Fisher (eds.), *The Physiology of Tropical Field Crops*. pp. 305-351. Wiley & Sons: Chichester, U.K.
- Lal, R., E. Regnier, D. J. Exkert, W. M. Edwards, and R. Hammond. 1991. Expectations of cover crops for sustainable agriculture. In W. L. Hargrove (ed.), *Cover Crops for Clean Water*. pp. 1-14. Soil and Water Conservation Society: Iowa.
- Larcher, W. 1980. *Physiological Plant Ecology*. Springer-Verlag: New York.
- Leather, G. R., and F. A. Einhellig. 1986. Bioassays in the study of allelopathy. In A. R. Putnam and C. S. Tang (eds.), *The Science of Allelopathy*. pp. 133-146. John Wiley & Sons: New York.

- Letourneau, D. K. 1986. Associational resistance in squash monoculture and polycultures in tropical Mexico. *Environmental Entomology*. 15:285-292.
- Levins, R. 1968. *Evolution in Changing Environments*. Princeton University Press: Princeton.
- Linn, L. 1984. The effects of *Spergula arvensis* borders on aphids and their natural enemies in Brussels sprouts. M.A. Thesis, University of California, Santa Cruz.
- Liverman, D. M., M. E. Hanson, B. J. Brown, and J. R. W. Merideth. 1988. Global sustainability: towards measurement. *Environmental Management*. 12:133-143.
- Loomis, R. S., and D. J. Connor. 1992. *Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Loucks, O. L. 1977. Emergence of research on agroecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 8:173-192.
- Lowrance, R. R., R. F. Hendrix, and E. P. Odum. 1986. A hierarchical approach to sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*. 1:169-173.
- Lowrance, R., B. R. Stinner, and G. J. House. 1984. *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*. Wiley: New York.
- Lubchenco, J., A. Olson, L. Brubaker, S. Carpenter, M. Holland, S. Hubbell, S. Levin, J. MacMahon, P. Matson, J. Melillo, H. Mooney, C. Peterson, H. Pulliam, L. Real, P. Regal, and P. Risser. 1991. The sustainable biosphere initiative: An ecological research agenda. *Ecology*. 72:371-412.
- Ludlow, M. M. 1985. Photosynthesis and dry matter production in C3 legumes and C4 grasses. *Australian Journal of Plant Physiology*. 12:557-572.
- Lyles, L. 1988. Basic wind erosion processes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 22/23:91-101.
- Lyon, T. L., H. O. Buckman, and N. C. Brady. 1952. *The Nature and Properties of Soils*. 5th ed. Macmillan: New York.
- MacArthur, R. H. 1962. Generalized theorems of natural selection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 43:1893-1897.
- MacArthur, R. H., and E. O. Wilson. 1967. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton Univ. Press: Princeton.
- McNaughton, K. G. 1988. Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 22/23:17-39.
- McNaughton, S.J. 1985. Ecology of a grazing ecosystem: The Serengeti. *Ecological Monographs*. 55:259-294.
- Minchin, F. R., R. J. Summerfield, A. R. J. Eaglesham, and K. A. Stewart. 1978. Effects of short-term waterlogging on growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Journal of Agricultural Science*. 90:355-366.
- Monteith, J. L. 1973. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, Ltd.: London.
- Mountjoy, D. C., and S. R. Gliessman. 1988. Traditional management of a hillside agroecosystem in Tlaxcala, Mexico: an ecologically-based maintenance system. *American Journal of Alternative Agriculture*. 3:3-10.
- Muller, C. H. 1974. Allelopathy in the environmental complex. In B. R. Strain and W. D. Billings (eds.), *Vegetation and Environment*, Part VI. pp. 73-85. W. Junk B.V. Publisher: The Hague.
- Nabham, G. P. 1989. *Enduring Seeds: Native American Agriculture and Wild Plant Conservation*. North Point Press: San Francisco.
- Nair, P. K. R. 1983. Tree integration on farmlands for sustained productivity of small holdings. In W. Lockeretz (ed.), *Environmentally Sound Agriculture*. pp. 333-350. Praeger: New York.
- Nair, P. K. R. 1984. *Soil Productivity Aspects of Agroforestry: Science and Practice in Agroforestry*. International Council for Research in Agroforestry (ICRAF): Nairobi, Kenya.
- National Research Council. 1989. *Alternative Agriculture*. National Academy Press: Washington, D.C.
- Naylor, R. E. L. 1984. Seed ecology. *Advances in Research and Technology of Seeds*. 9:61-93.
- Ninez, V. 1985. Introduction: household gardens and small scale food production. *Food and Nutrition Bulletin*. 7(3):1-5.
- Norton, R. L. 1988. Windbreaks: benefits to orchard and vineyard crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 22/23:205-213.
- Nye, P. H., and D. J. Greenland. 1960. *The Soil Under Shifting Cultivation*. Commonwealth Bureau of Soils: Harpenden.
- Odum, E.P. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science*. 164:262-270.
- Odum, E.P. 1971. *Fundamentals of Ecology*. W.B. Saunders: Philadelphia.

- Odum, E. P. 1984. Properties of agroecosystems. In R. Lowrance, B. R. Stinner, and G. J. House (eds.), *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*. pp. 5-12. John Wiley & Sons: New York.
- Odum, E. P. 1993. *Ecology and Our Endangered Life-Support Systems*. Sinauer Associates Incorporated: Sunderland, Massachusetts.
- Office of Technology Assessment. 1985. *Technologies to Benefit Agriculture and Wildlife*. Workshop Proceedings. U.S. Congress, Office of Technology Assessment: Washington, D.C.
- Oldeman, L. R., et al. 1991. World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation: An Explanatory Note. 2nd ed. International Soil Reference and Information Centre and U.N. Environment Programme: Wageningen, Netherlands and Nairobi.
- Oldfield, M. L., and J. B. Alcorn. 1987. Conservation of traditional agroecosystems. *Science*. 37:199-208.
- Overland, L. 1966. The role of allelopathic substances in the "smother crop" barley. *American Journal of Botany*. 53:423-432.
- Papadakis, J. 1938. *Compendium of Crop Ecology*. Buenos Aires, Argentina.
- Paulus, J. 1994. Ecological aspects of orchard floor management in apple agroecosystems of the central California coast. Ph.D. dissertation, University of California, Santa Cruz.
- Pianka, E. R. 1970. On r - and K -selection. *American Naturalist*. 104:592-597.
- Pianka, E. R. 1978. *Evolutionary Ecology*. 2nd ed. Harper and Row: New York.
- Pickett, S. T. A., and P. White (ed.). 1985. *The Ecology of Natural Disturbances and Patch Dynamics*. Academic Press: Orlando, Florida.
- Pimentel, D. (ed.). 1980. *Handbook of Energy Utilization in Agriculture*. CRC Press: Boca Raton, FL.
- Pimentel, D. 1984. Energy flow in agroecosystems. In R. Lowrance, B. R. Stinner, and G. J. House (eds.), *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*. pp. 121-132. Wiley: New York.
- Pimentel, D. 1992. Energy inputs in production agriculture. In R. C. Fluck (ed.), *Energy in Farm Production*. vol. 6, pp. 13-29. Elsevier: Amsterdam.
- Pimentel, D., D. Nafus, W. Vergara, D. Papaj, L. Jaconetta, M. Wulfe, L. Olsvig, K. French, M. Loye, and E. Mendoza. 1978. Biological solar energy conversion and U.S. energy policy. *Bioscience*. 28:376-382.
- Pimentel, D., L. McLaughlin, A. Zepp, B. Latikan, T. Kraus, P. Kleinman, F. Vancini, W. Roach, E. Graap, W. Keeton, and G. Selig. 1991. Environmental and economic effects of reducing pesticide use. *BioScience*. 41:402-409.
- Pimentel, D., U. Stachow, D. A. Takacs, J. W. Brubaker, A. R. Dumas, J. J. Meaney, J. A. S. O'Neil, D. E. Onsi, and D. B. Corzilius. 1992. Conserving biological diversity in agricultural and forestry systems. *BioScience*. 42:354-362.
- Pimentel, D., W. Dahzhong, and M. Giampietro. 1990. Technological changes in energy use in U.S. agricultural production. In S. R. Gliessman (ed.), *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. pp. 305-321. Springer-Verlag: New York.
- Pinchinat, A. M., J. Soria, and R. Bazan. 1976. Multiple cropping in tropical America. In R. I. Papendick, P. A. Sanchez, and G. B. Triplett (eds.), *Multiple Cropping*. pp. 51-62. American Society of Agronomy: Madison, Wisconsin.
- Piper, J. K. 1994. Perennial polycultures: grain agriculture fashioned in the prairie's image. *The Land Report* (51):7-13.
- Price, P. W. 1976. Colonization of crops by arthropods: non-equilibrium communities in soybean fields. *Environmental Entomology*. 5:605-611.
- Purseglove, J. W. 1972. *Tropical Crops: Monocotyledons*. Longman: London.
- Putnam, A. R., and L. A. Weston. 1986. Adverse impacts of allelopathy in agricultural systems. In A. R. Putnam and C. S. Tang (eds.), *The Science of Allelopathy*. pp. 43-56. John Wiley and Sons: New York.
- Putnam, A. R., and W. B. Duke. 1974. Biological suppression of weeds: Evidence for allelopathy in accessions of cucumber. *Science*. 185:370-372.
- Radosevich, S. R., and J. S. Holt. 1984. *Weed ecology: Implications for Vegetation Management*. John Wiley & Sons: New York.
- Raison, R. J. 1979. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: a review. *Plant and Soil*. 51:73-108.
- Ranney, J. W., M. C. Brunner, and J. B. Levenson. 1981. The importance of edge in the structure and dynamics of forest islands. In R. L. Burgess and D. M. Sharp (eds.), *Forest Island Dynamics in Man-Do-*

- minated Landscapes*. pp. 67-95. Springer-Verlag: New York.
- Rappaport, R. A. 1971. The flow of energy in an agricultural society. *Scientific American*. 224:117-132.
- Reganold, J. P., L. F. Elliot, and Y. L. Unger. 1987. Long-term effects of organic and conventional farming on soil erosion. *Nature*. 330:370-372.
- Reifsnnyder, W. S., and T. O. Darnhofer. 1989. *Meteorology and Agroforestry*. International Centre for Research in Agroforestry: Nairobi, Kenya.
- Rice, E. L. 1984. *Allelopathy*. 2nd ed. Academic Press: Orlando, Florida.
- Risch, S. 1980. The population dynamics of several herbivorous beetles in a tropical agroecosystem: the effect of intercropping corn, beans, and squash in Costa Rica. *Journal of Applied Ecology*. 17:593-612.
- Risser, P. G. 1995. Indicators of grassland sustainability: A first approximation. In M. Munasinghe and W. Shearer (eds.), *Defining and Measuring Sustainability: The Biophysical Foundations*. pp. 310-319. World Bank: Washington, D.C.
- Robinson, R. A. 1996. *Return to Resistance: Breeding Crops to Reduce Pesticide Dependence*. AgAccess: Davis, CA.
- Ruiz-Rosado, O. 1984. Effects of weed borders on the dynamics of insect communities in a cauliflower agroecosystem. M.A. Thesis, University of California, Santa Cruz.
- Russell, W. M. S. 1968. The slash-and-burn technique. *Natural History*. 78:58-65.
- Sahagian, D. L., F. W. Schwartz, and D. K. Jacobs. 1994. Direct anthropogenic contributions to sea level rise in the twentieth century. *Nature*. 367:54-56.
- Salick, J., and L. C. Merrick. 1990. Use and maintenance of genetic resources: crops and their wild relatives. In C. R. Carroll, J. H. Vandermeer, and P. M. Rosset (eds.), *Agroecology*. pp. 517-548. McGraw-Hill: New York.
- Sanchez, P. A. 1976. *Properties and Management of Soils in the Tropics*. John Wiley & Sons: New York.
- Schaller, N. 1993. The concept of agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*. 46:89-98.
- Scriber, J. M. 1984. Nitrogen nutrition of plants and insect invasion. In R. D. Hauck (ed.), *Nitrogen in Crop Production*. pp. 441-460. American Association of Agronomy: Madison, Wisconsin.
- Serageldin, I. 1995. *Toward Sustainable Management of Water Resources*. World Bank: Washington, D.C.
- Settle, W. H., H. Ariawan, E. T. Astuti, W. Cahyana, A. L. Hakim, D. Hindayana, A. S. Lestari, Pajarningsih, and Sartanto. 1996. Managing tropical rice pests through conservation of generalist natural enemies and alternative prey. *Ecology*. 77:1975-1988.
- Seubert, C. E., P. A. Sanchez, and C. Valverde. 1977. Effects of land clearing methods on soil properties of an ultisol and crop performance in the Amazon jungle of Peru. *Tropical Agriculture (Trinidad)*. 54:434-437.
- Simberloff, D. S., and E. O. Wilson. 1969. Experimental zoogeography of islands: the colonization of empty islands. *Ecology*. 50:278-296.
- Smil, V., P. Nachman, and T. V. Long. 1983. *Energy Analysis in Agriculture: An Application to U.S. Corn Production*. Westview Press: Boulder, Colorado.
- Smith, M. E., and C. A. Francis. 1986. Breeding for Multiple Cropping Systems. In C. A. Francis (ed.), *Multiple Cropping Systems*. pp. 219-249. Macmillan Publishing Company: New York.
- Smith, S. 1992. Farming—It's declining in the U.S. *Choices*. 7:8-10.
- Snow, A. S., and P. M. Palma. 1997. Commercialization of transgenic plants: potential ecological risks. *BioScience*. 47(2).
- Soil Conservation Service. 1984. Strawberry Hills target area: watershed area study report, Monterey County, CA. USDA, River Basin Planning Staff, Soil Conservation Service.
- Soule, J. D., and J. K. Piper. 1992. *Farming in Nature's Image*. Island Press: Washington, DC.
- Stauber, K. 1994. The futures of agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*. 9:9-15.
- Stern, W. R., and C. M. Donald. 1961. Light relationships in grass/clover swards. *Australian Journal of Agricultural Research*. 13:599-614.
- Stinner, B. R., and G. J. House. 1987. Role of ecology in lower-input, sustainable agriculture: An introduction. *American Journal of Alternative Agriculture*. 2:146-147.
- Stinner, B. R., D. A. Crossley, E. P. Odum, and R. L. Todd. 1984. Nutrient budgets and internal cycling of N, P, K, Ca, and Mg in conventional, no-tillage, and old-field ecosystems on the Georgia Piedmont. *Ecology*. 65:354-369.

- Swezey, S. L., J. Rider, M. W. Werner, M. Buchanan, J. Allison, and S. R. Gliessman. 1994. Granny Smith conversions to organic show early success. *California Agriculture*. 48:36-44.
- Tansley, A. G. 1935. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*. 16:284-307.
- Theunissen, J., and H. van Duden. 1980. Effects of intercropping with *Spergula arvensis* on pests of Brussels sprouts. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 27:260-268.
- Tibke, G. 1988. Basic principles of wind erosion control. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 22/23:103-122.
- Tischler, W. 1965. *Agrarökologie*. Fischer Verlag: Jena.
- Trenbath, B. R. 1976. Plant interactions in mixed crop communities. *American Society of Agronomy Special Publications*. 27:129-169.
- Trenbath, B. R. 1974. Biomass productivity in mixtures. *Advances in Agronomy*. 26:177-210.
- Ullstrup, A. J. 1972. The impact of the southern corn leaf blight epidemics of 1970-1971. *Annual Review of Phytopathology*. 10:37-50.
- United Nations Development Program. 1995. *Agroecology: Creating the Synergism for a Sustainable Agriculture*. UNDP: New York.
- Van der Pijl, L. 1972. *Principles of Dispersal in Higher Plants*. Springer-Verlag: Berlin.
- Van Tuijl, W. 1993. *Improving Water Use in Agriculture: Experiences in the Middle East and North Africa*. Report # 201. World Bank.
- Vandermeer, J. 1989. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge University Press: New York.
- Waldon, H. 1994. Resilience, equilibrium, and sustainability in three ecosystems. Ph.D. dissertation, University of California, Santa Cruz.
- Weiner, J. 1990. Plant Population Ecology in Agriculture. In C. R. Carroll, J. H. Vandermeer, and P. M. Rossett (eds.), *Agroecology*. pp. 235-262. McGraw Hill: New York.
- Went, F. 1944. Thermoperiodicity in growth and fruiting of the tomato. *American Journal of Botany*. 31:135-150.
- Whittaker, R. H. 1975. *Communities and Ecosystems*. 2nd ed. MacMillan: New York.
- Wiersum, K. F. 1981. Introduction to the agroforestry concept. In Wiersum (ed.), *Viewpoints in Agroforestry*. Agricultural University of Wageningen, The Netherlands.
- Wilken, G. C. 1969. Drained-field agriculture: an intensive farming system in Tlaxcala, Mexico. *The Geographical Review*. 59:215-241.
- Wilken, G. C. 1988. *Good Farmers: Traditional Agricultural Resource Management in Mexico and Central America*. University of California Press: Berkeley.
- Wilkes, G. 1991. *In situ* conservation of agricultural systems. In M. L. Oldfield and J. B. Alcorn (eds.), *Biodiversity: Culture, Conservation, and Ecocodevelopment*. pp. 86-101. Westview Press: Boulder, CO.
- Wiley, R. W. 1981. A scientific approach to intercropping research. Proceedings, International Workshop on Intercropping, pp. 4-14. ICRISAT: India.
- Willis, R. J. 1985. The historical bases of the concept of allelopathy. *Journal of the History of Biology*. 18(1):71-102.
- Wilsie, C. P. 1962. *Crop Adaptation and Distribution*. Freeman: San Francisco.
- Wilson, E. O. 1992. *The Diversity of Life*. W. W. Norton & Co.: New York & London.
- Worsham, A. D. 1989. Current and potential techniques using allelopathy as an aid in weed management. In C. H. Chou and G. R. Waller (eds.), *Phytochemical Ecology: Allelochemicals, Mycotoxins and Insect Pheromones and Allomones*. pp. 275-292. Institute of Botany: Taipei, Taiwan.
- Young, A. 1989. The environmental basis of agroforestry. In W. S. Reifsnyder and T. O. Darnhofer (eds.), *Meteorology and Agroforestry*. pp. 29-48. International Council for Research in Agroforestry: Nairobi, Kenya.
- Zelitch, I. 1971. *Photosynthesis, Photorespiration, and Plant Productivity*. Academic Press: New York.
- Zhengfang, L. 1994. Energetic and ecological analysis of farming systems in Jiangsu Province, China. Presented at the 10th International Conference of the International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM), Lincoln University, Lincoln, New Zealand, December 9-16.

— GLOSARIO —

abono verde Materia orgánica adicionada al suelo cuando una cobertura vegetal, frecuentemente leguminosas, está cultivada en él.

acame Volcamiento de plantas o cultivos debido a fuertes vientos, usualmente causan ruptura de las raíces superficiales o del tallo.

adaptación (1) Capacidad de un organismo o sus partes para resistir las condiciones del ambiente. (2) Proceso evolutivo por medio del cual el genoma de una especie y sus características fenotípicas cambian a través del tiempo en respuesta a los cambios en el ambiente.

agroecología Ciencia que aplica los principios y conceptos ecológicos en el diseño y manejo de los agroecosistemas sostenibles.

agroecosistema Sistema agrícola conceptualizado y conformado como un ecosistema.

agroecosistema de temporal Sistema agrícola en el cual la necesidad de agua de los cultivos es llenada por la precipitación pluvial.

agroforestería Práctica de incluir árboles en los agroecosistemas de producción de cultivos o animales.

agua capilar El agua que ocupa los microporos del suelo y es movilizada por las partículas del suelo con una fuerza entre 0,3 y 31 barras de succión. Mucha de esta agua (aquella porción que es mantenida por las partículas con menos de 15 barras de succión es de fácil disponibilidad para las raíces de las plantas).

agua de fácil disponibilidad Aquella porción del agua mantenida en el suelo que puede ser fácilmente absorbida por las raíces de la planta – generalmente agua capilar entre 0,3 y 15,0 barras de succión.

agua gravitacional Es la porción de agua en el suelo que no es atraída por las partículas del suelo con suficiente fuerza para resistir la fuerza de gravedad.

agua higroscópica La humedad que se adhiere a las partículas del suelo con mayor fortaleza, usualmente

con más de 31 barras de succión; puede permanecer en el suelo aún después de ser secado en un horno.

alelopatía Interacción de interferencia en la cual una planta libera al ambiente un compuesto que inhibe o estimula el crecimiento o desarrollo de otras plantas.

aluvión Suelo que ha sido transportado a su actual localización por flujos de agua.

amensalismo Interacción entre organismos en la cual uno de ellos impacta negativamente al otro sin recibir beneficio directo alguno.

amplitud de nicho Tamaño o rango de uno o más de las dimensiones del espacio multidimensional, ocupado por el nicho de una especie en particular. La amplitud de nicho de una especie generalista es más grande que el de una especialista.

arvense Una planta no cultivada, comúnmente llamada maleza. Este término se usa en este libro porque permite un concepto más amplio de la planta no cultivada, reconociendo su papel ecológico y social en el agroecosistema y los posibles beneficios adquiridos por su presencia.

autopolinización Fertilización de los óvulos de una planta por su mismo polen.

autótrofo Organismo que convierte moléculas inorgánicas a moléculas orgánicas utilizando la energía solar, o la oxidación de sustancias inorgánicas, para satisfacer sus propias necesidades de moléculas orgánicas alimenticias.

banco de semillas Total de semillas presentes en el suelo.

biomasa La masa de toda la materia orgánica en un sistema dado en un momento determinado en el tiempo.

calentamiento catabático Proceso que ocurre cuando una gran masa de aire se expande después de haber sido forzada a través de una montaña y llega a ser más caliente y más seca como resultado de la expansión.

capa límite Capa de aire saturada con vapor de agua (de la transpiración) que se forma junto a la superficie foliar cuando no hay movimiento de aire.

capacidad de campo La cantidad de agua que el suelo puede contener una vez que el agua gravitacional ha drenado; esta agua es principalmente agua capilar, adherida a las partículas de suelo por lo menos con 0,3 barras de succión.

capacidad de intercambio catiónico Medida de la capacidad del suelo de atraer iones cargados positivos (cationes), los cuales incluyen muchos nutrimentos importantes.

capacidad de labranza La combinación de las características de estructura del suelo, porosidad, y facilidad de cultivo.

ciclo biogeoquímico Forma cíclica de transformaciones que sufren los elementos químicos críticos para la vida (como el carbono, nitrógeno o fósforo) a través de los organismos en una comunidad biótica y de su ambiente físico.

ciclo hidrológico Procesos que comprenden la evaporación del agua de la superficie de la tierra, su condensación en la atmósfera y su retorno a la superficie como precipitación.

citoesterilidad Condición de esterilidad masculina genéticamente controlada que se da en una línea de una variedad de cultivo autopolinizable. Se utiliza una línea reproductiva citoestéril como línea parental en la producción de semillas híbridas.

clímax Según la teoría ecológica clásica, es el último punto del proceso sucesional; hoy en día nos referimos más bien al estado de madurez alcanzado cuando la sucesión logra un estado de cambio dinámico alrededor de un punto de equilibrio.

clon Un individuo producido asexualmente a partir de tejidos, células o el genoma de otro individuo. Un clon es genéticamente idéntico al individuo del cual se derivó.

cobertura viva Un cultivo de cobertura que se siembra en forma intercalada con los cultivos principales durante el ciclo de cultivo.

coluvial Suelo que ha sido transportado a su ubicación actual por acción de la gravedad.

comensalismo Interacción entre organismos en la cual uno de ellos es beneficiado por la interacción mientras que el otro no es beneficiado ni perjudicado.

competencia Interacción en la que dos organismos toman del ambiente un recurso limitado que ambos requieren, viéndose afectados los dos en el proceso. La competencia se puede dar entre miembros de la misma

especie así como entre miembros de diferentes especies.

competencia interespecífica Competencia por recursos limitados entre individuos de diferentes especies.

competencia intraespecífica Competencia por recursos limitados entre individuos de la misma especie.

complejo ambiental Conjunto de todos los factores individuales del ambiente actuando e interactuando de manera concertada.

comunidad Todos los organismos que viven juntos en una localidad determinada.

consumidor Un organismo que ingiere otros organismos (o sus partes o productos) para obtener su energía alimenticia.

cosecha en pie La biomasa total de plantas en un ecosistema en un punto específico en el tiempo.

densidad aparente Masa de suelo por unidad de volumen.

densodependiente Directamente relacionado a la densidad poblacional. Este término usualmente se utiliza para describir los mecanismos de retroalimentación que limitan el crecimiento en una población de organismos.

densoindependiente No está directamente relacionado con la densidad poblacional. Este término usualmente se utiliza para describir los mecanismos de retroalimentación que limitan el crecimiento en una población de organismos.

depredación Una interacción en la cual un organismo mata y consume a otro organismo.

depredador Un animal que consume a otro animal para satisfacer sus requerimientos nutritivos.

descomponedor Microorganismo, hongo o bacteria que obtiene sus nutrimentos o energía alimenticia mediante la degradación de materia fecal y materia orgánica muerta, absorbiendo posteriormente algunos de sus contenidos nutricionales.

detritivoro Un organismo que se alimenta de materia fecal y orgánica muerta.

diversidad (1) Número o variedad de especies en una localidad, comunidad, ecosistema o agroecosistema. (2) El grado de heterogeneidad de los componentes bióticos de un ecosistema o agroecosistema (ver *diversidad ecológica*).

diversidad alfa Variedad de especies en un sitio específico en una comunidad o agroecosistema.

diversidad beta Diferencia en el arreglo de las especies de una localidad o hábitat a otra cercana, o de una parte del agroecosistema con respecto a otra.

diversidad de nicho Diferencia en los patrones de uso de los recursos de especies similares que permiten su coexistencia en un mismo ambiente.

diversidad ecológica Grado de heterogeneidad de la composición de especies de un ecosistema o agroecosistema, de su potencial genético, su estructura vertical y horizontal, estructura trófica, funcionamiento ecológico y cambio en el tiempo.

domesticación Proceso de alteración, mediante selección dirigida, de la constitución genética de una especie, de tal modo que se incrementa la utilidad de esa especie para los humanos.

drenaje de aire frío Flujo de aire frío que baja por la ladera de la montaña durante la noche, cuando la reradiación de calor (y por lo tanto enfriamiento del aire) se da más rápidamente a mayor altitud.

ecología del paisaje Estudio de las interacciones y factores ambientales a una escala que comprende más que un ecosistema en el tiempo.

ecosistema Sistema funcional de relaciones complementarias entre los organismos vivos y su ambiente en un área física determinada.

ecotipo Población de una especie que difiere genéticamente de otras poblaciones de la misma especie debido a que las condiciones locales han seleccionado ciertas características fisiológicas y morfológicas únicas.

ecotono Zona de transición gradual entre dos ecosistemas, comunidades o hábitats diferentes.

efecto Coriolis Desviación de las corrientes de aire en las celdas de circulación atmosféricas debido a la rotación de la Tierra.

efecto de borde Fenómeno de una comunidad de borde o ecotono, que tiene mayor diversidad biológica que las comunidades vecinas.

endurecimiento Exposición de las plántulas o plantas a temperaturas frías para incrementar su resistencia a temperaturas aún más frías.

entradas de energía ecológica Formas de energía utilizadas en la producción agrícola que provienen directamente del sol, también considerada como un insumo natural.

epífila Planta que utiliza la hoja de otra planta para su soporte, sin extraer nutrimentos de la planta hospedante.

epífita Planta que utiliza el tronco o tallo de otra planta para su soporte, sin extraer nutrimentos de la planta hospedante.

equilibrio dinámico Condición caracterizada por un estado de balance general en el proceso de cambio de un ecosistema, el cual es posible por la resiliencia del sistema, que produce en una estabilidad relativa de su estructura y función, a pesar de los cambios continuos y las perturbaciones de pequeña escala.

erosión genética Pérdida de la diversidad genética en organismos domesticados debido a la dependencia humana de unas pocas variedades genéticamente uniformes de productos alimenticios animales y vegetales.

especialista Una especie con poca tolerancia al ambiente.

especie dominante Aquella especie con el mayor impacto sobre los componentes bióticos y abióticos de su comunidad.

estoma Las aperturas en una superficie de la hoja a través de las cuales los gases entran y salen de la hoja al ambiente.

estratega-k Una especie que vive en condiciones donde la mortalidad es la variable densodependiente; un típico estratega K tiene un tiempo de vida relativamente largo e invierte relativamente gran cantidad de energía en cada uno de los pocos descendientes que produce.

estratega-r Especie que existe en condiciones ambientales relativamente hostiles y cuya mortalidad es determinada por factores densoindependientes; así un estratega-r requiere más energía para la reproducción que para el crecimiento.

estructura trófica La organización de alimentación y relaciones de transferencia de energía que determinan la ruta flujo de energía a través de una comunidad o ecosistema.

evapotranspiración Todas las formas de evaporación de agua líquida de la superficie terrestre, incluyendo la evaporación de cuerpos de agua y humedad del suelo, así como la evaporación de la superficie de las hojas que ocurre en el proceso de la transpiración.

extensión de nicho Esencialmente es un sinónimo para *amplitud de nicho*.

factor abiótico Componente no vivo del ambiente tal como el suelo, nutrimentos, luz, fuego o humedad.

factor biótico Aspecto del ambiente, relacionado con los organismos o sus interacciones.

factor de compensación Factor del ambiente que supera, elimina o modifica el impacto de otro factor.

fenotipo Expresión física del genoma; características físicas de los organismos.

fijación de carbono Parte del proceso fotosintético en el cual los átomos de carbono son extraídos del dióxido de carbono atmosférico y utilizados para producir compuestos orgánicos simples que eventualmente llegan a ser glucosa.

fotoperíodo Número total de horas luz del día.

fotorespiración La sustitución del derroche energético de oxígeno por dióxido de carbono, resultado de las reacciones oscuras durante la fotosíntesis; ocurre cuando los estomas de la planta se cierran y la concentración del dióxido de carbono disminuye.

fotosintato Azúcar simple como producto final de la fotosíntesis.

fragmentación Una medida de la diversidad de estados sucesionales presentes en una área específica.

generalista Una especie que tolera un amplio ámbito de condiciones ambientales; un generalista tiene un nicho ecológico amplio.

genotipo Es la información genética de un organismo, considerada como un todo.

hábitat Es el ambiente particular caracterizado por un conjunto específico de condiciones ambientales, en el cual existe una especie dada.

herbívoro Animal que se alimenta exclusiva o principalmente de plantas, son los que convierten biomasa vegetal en biomasa animal.

heterosis Es la producción excepcional de vigor o productividad de una descendencia híbrida originada de un cruzamiento directo de dos líneas puras de cierta planta.

heterótrofo Organismo que consume otro organismo para satisfacer sus necesidades de energía.

hidratación Adición de moléculas de agua a la estructura química mineral.

hidratación hídrica Agua que es químicamente ligada a partículas del suelo.

hidrólisis Reemplazo de cationes en la estructura de un mineral silicato con iones de hidrógeno, provocando la descomposición del mineral.

hidróxido de arcilla Un componente mineral del suelo sin una estructura cristalina definitiva, compuesto de hierro hidratado y óxidos de aluminio.

hipótesis de perturbación intermedio Teoría que afirma que la diversidad y productividad son más altos en un ecosistema natural cuando la perturbación moderada ocurre periódicamente pero no con demasiada frecuencia.

horizontes Estratos distinguibles visualmente en el perfil del suelo.

humedad relativa Tasa de contenido actual de agua en el aire por la cantidad de agua que el aire es capaz de mantener a una temperatura particular.

humificación Es la descomposición o metabolización de la materia orgánica en el suelo.

humus Fracción de la materia orgánica del suelo resultante de la descomposición o mineralización del material orgánico.

índice de área foliar Una medida de la cobertura de hojas sobre una cierta área del suelo, dado por el radio del área total de la superficie de la hoja con respecto al área de la superficie del suelo.

índice de productividad Medida de la cantidad de biomasa invertida en el producto cosechado en relación con la cantidad total permanente de biomasa presente en el resto del sistema.

índice de Shannon Medida de la diversidad de especies de un ecosistema basado en la teoría de información.

índice Simpson Medida de la diversidad de un ecosistema basado en el concepto de dominancia.

influencia continental Efecto climático producido por estar distante de los efectos moderadores de un gran cuerpo de agua.

influencia marítima El efecto moderado de un gran cuerpo de agua, tales como un océano, sobre el clima y tiempo de un área.

ingeniería genética La transferencia por métodos biotecnológicos de material genético de un organismo a otro.

insolación La conversión de energía solar de onda corta a energía de calor de onda larga en la superficie de la Tierra.

insumos de energía cultural Formas de energía utilizada en la producción agrícola que vienen de fuentes controladas o proveídas por los humanos. Sinónimo: *entrada de energía cultural*

inversión Compresión de aire húmedo entre dos capas de aire frío en un valle.

macronutrientes Nutrientes que necesitan las plantas en grandes cantidades; los macronutrientes incluyen carbono, nitrógeno, oxígeno, fósforo, azufre y agua.

micorriza Conexiones simbióticas de hongos con raíces de plantas mediante la cual un organismo fungoso proporciona nutrientes y agua a la planta y ésta a su vez proporciona azúcares al hongo.

microclima Condiciones ambientales en la vecindad inmediata de un organismo.

micronutriente Nutrientes que necesitan las plantas para su supervivencia pero en cantidades relativamente pequeñas.

mineralización El proceso por el cual los residuos orgánicos son desdoblados liberados como nutrientes minerales que pueden ser utilizados por las plantas.

mosaico sucesional Un mosaico de hábitats o áreas en fases diferentes de sucesión.

mutualismo Interacción en el cual dos organismos se impactan uno al otro positivamente; ninguno tiene éxito en la ausencia de la interacción.

nicho Ver *nicho ecológico*.

nicho ecológico Lugar y función del organismo en el ambiente, definido por su utilización de los recursos.

nicho potencial La posible distribución máxima de una especie en el medio ambiente.

nicho realizado Distribución actual de un organismo en el ambiente (ver *nicho potencial*).

nivel trófico Un nivel en la jerarquía de la cadena alimenticia dentro de un ecosistema.

nutriente Un material utilizado en la nutrición de un organismo, compuesto de nutrientes encontrados en el suelo, materia orgánica, y alimentos consumidos.

nutriente limitante Nutriente que no está presente en el suelo en cantidades suficientes para permitir el crecimiento óptimo de la planta.

organismo Un individuo de una especie.

oxidación La pérdida de electrones de un átomo acom-

pañado por el cambio de uno reducido a un estado oxidado.

paisaje fragmentado Un paisaje con diversidad de estados sucesionales o tipos de hábitat.

parasitismo Interacción en que un organismo se alimenta de otro, causándole daño, pero generalmente sin matarlo.

parásito Un organismo que usa otro organismo como alimento, dañando al otro organismo.

parasitoide Un parásito que se alimenta de depredadores u otros parásitos.

percolación Movimiento del agua a través del suelo por la fuerza de gravedad.

perfil de suelo El conjunto de capas horizontales visibles en un corte vertical del suelo.

perturbación Evento o proceso de corto plazo que altera una comunidad o ecosistema mediante la modificación de los niveles relativos de población de por lo menos algunas de las especies que la componen.

población Grupo de individuos de la misma especie que viven en una misma región geográfica.

polinización abierta Es la dispersión natural de polen entre todos los miembros de una población de cultivo, haciendo una polinización cruzada, causando como resultado un máximo de mezcla genética y diversidad.

polinización cruzada Fertilización de una flor con el polen de la flor de otro individuo de la misma especie.

poliploide Posee tres o más veces el número haploide de cromosomas.

producción Rendimientos del cultivo o cosecha.

producción primaria bruta Cantidad de energía luminosa convertida en biomasa en un sistema.

productividad Procesos y estructuras ecológicas que permiten la producción en un agroecosistema.

productividad primaria bruta Es la tasa de conversión de energía solar en biomasa en un ecosistema.

productividad primaria neta La diferencia entre la tasa de conversión de energía solar en biomasa en un ecosistema y la tasa de energía usada para mantener los productos del sistema.

productor Organismo capaz de convertir la energía solar en biomasa.

propiedad emergente Característica de un sistema que

se deriva de la interacción de sus partes y que no es observable o inherente en las partes consideradas en forma separada.

protocooperación Interacción en la cual ambos organismos son beneficiados si la interacción ocurre, pero ninguno es perjudicado si no ocurre.

punto de compensación de luz Es el nivel de intensidad de luz que necesita una planta para producir una cantidad de fotosintato igual a la cantidad de uso para la respiración.

punto de compensación del dióxido de carbono Concentración del dióxido de carbono en los cloroplastos de las plantas debajo del cual la cantidad de fotosintatos producidos no compensan la cantidad de fotosintatos utilizados en la respiración.

punto de rocío Temperatura a la cual la humedad relativa alcanza el 100% y el vapor de agua se condensa en pequeñas gotas de agua. Este punto varía dependiendo del contenido absoluto de vapor de agua en el aire.

punto de saturación Nivel de intensidad de luz en el cual los pigmentos fotosintéticos son estimulados completamente y son incapaces de usar luz adicional.

punto permanente de marchitez El nivel bajo de humedad del suelo bajo el cual la planta se marchita y es incapaz de recuperarse.

quema intencional Tipo de incendio provocado y controlado por el ser humano para lograr algún objetivo de manejo, como por ejemplo la mejora de una pastura en un sistema de pastoreo.

raza criolla Linaje de una especie criada usando métodos tradicionales de selección dirigida y como resultado siendo adaptada a una localidad específica. Sinónimos: *variedad criolla, variedad local*

reacciones de luz Los componentes de la fotosíntesis en los cuales la energía de la luz es convertida en energía química en la forma de ATP y NADPH.

reacciones oscuras Proceso de la fotosíntesis que no requiere de luz; específicamente los procesos de fijación de carbón y síntesis de azúcares en el ciclo de Calvin. Sinónimo: *reacciones oscuras*.

regolita Capa o manto de material no consolidado (suelo y subsuelo mineral) que se encuentra localizado entre la superficie del suelo y la roca madre.

repartición del carbono Forma en la cual una planta

distribuye los fotosintatos producidos en cada una de sus partes.

resistencia ambiental Capacidad genética de un organismo para soportar estrés, amenazas o factores limitantes en el ambiente.

respuesta Cambio fisiológico en una planta o animal inducido por una condición externa, generalmente ambiental.

riqueza de especie El número de diferentes especies en una comunidad o ecosistema.

saltación Transporte de pequeñas partículas de suelo sobre la superficie de éste por el viento.

selección dirigida El proceso de control de cambio genético en las plantas y animales domesticados mediante la manipulación del ambiente y de los procesos reproductivos.

selección masiva El método tradicional de selección dirigida, en el cual la semilla es recolectada a partir de aquellos individuos de una población que muestran uno o más características deseables y que luego son usados para la siembra de otras plantaciones de ese cultivo.

selección natural El proceso por el cual los rasgos adaptativos se incrementan con frecuencia en una población debido a los diferentes procesos reproductivos del individuo que posee esos rasgos.

silicato de arcilla El componente del suelo hecho principalmente de placas microscópicas de silicato de aluminio.

simbiosis Una relación entre organismos diferentes que viven en contacto directo.

sistema alimenticio El meta-sistema interrelacionado de los agroecosistemas, sus sistemas de soporte económico, social, cultural y tecnológico, así como los sistemas de distribución y consumo de alimentos.

sitio seguro Lugar específico que provee las condiciones ambientales necesarias para la germinación y crecimiento inicial de las semillas de las plantas.

sobrendimiento El rendimiento obtenido con cultivos intercalados es mayor que el rendimiento obtenido de las mismas especies sembradas en monocultivo en una área equivalente de tierra.

solución Proceso por el cual los minerales solubles son disueltos en el agua.

solución de suelo La fase líquida del suelo, compuesta de agua y solutos disueltos.

sostenibilidad La capacidad de un agroecosistema de mantenerse en el tiempo sin degradar el ambiente, sin perder su viabilidad económica, y con equidad social. Sinónimos: *sustentable, perdurable*

sucesión El proceso por cuál una comunidad da paso a otra.

sucesión primaria Sucesión ecológica en un sitio que no ha sido antes habitada por organismos vivos.

sucesión secundaria Sucesión ecológica en un sitio que fue ocupado previamente por organismos vivos pero que sufrió un severo disturbio.

suelo eólico Suelo que ha sido transportado a su ubicación actual por la acción del viento.

suelo glacial Es el suelo que a sido transportado hasta su sitio actual por el movimiento de los glaciales.

suelo residual Suelo formado en la ubicación actual.

suelo transportado Suelo que ha sido movido a su localización actual por fuerzas ambientales.

tasa relativa de transmisión de luz Porcentaje de la incidencia total de luz sobre el dosel de un sistema que llega hasta el suelo.

transpiración La evaporación de agua a través del estoma de la hoja, que causa un flujo de agua del suelo a través de la planta, hacia la atmósfera.

uniformidad de distribución de la especie El grado de heterogeneidad en la distribución espacial de especies en una comunidad o ecosistema.

valor de importancia Medida de la presencia de una especie en el ecosistema o comunidad—como el número de individuos, la biomasa, o la productividad—que se puede usar para determinar la contribución de la espe-

cie a la diversidad del sistema.

variedad sintética Un cultivo o una variedad hortícola que produjeron a través de la polinización cruzada de un número limitado de padres que cruza bien y tiene ciertos rasgos deseables.

vernalización El proceso en el que una semilla es expuesta a un periodo de frío que causa cambios que permiten la germinación.

viento de ladera Movimiento del aire causado por las diferentes tasas de calentamiento y enfriamiento entre las laderas de las montañas y los valles.

viento de montaña El movimiento del aire que ocurre en la noche sobre las laderas de las montañas cuando el aire se enfría más rápidamente en la parte superior que en la parte inferior.

viento de valle Movimiento de aire que ocurre cuando el calentamiento del valle causa que el aire caliente suba por las laderas de las montañas adyacentes.

vientos comunes Patrones generales de viento característicos de los anchos cinturones latitudinales en la superficie de la Tierra.

vigor híbrido Es la producción excepcional de vigor o productividad de una descendencia híbrida originada del cruce directo de dos líneas puras de cierta planta o animal. Sinónimo de *heterosis*.

vulnerabilidad genética La susceptibilidad genética de los cultivos uniformes hasta daños o destrucción causado por enfermedades, plagas o en menor grado debido a cambios en las condiciones climáticas.

zona de amortiguamiento Área con manejo menos intensivo y menor alteración, ubicada en los márgenes de un agroecosistema que protege al sistema natural adyacente de los potenciales impactos negativos de las actividades agrícolas y de manejo.

ÍNDICE

- ADN, 36, 197
 * replicación, 197
- ATP, 31, 32, 36
- Abeja europea, 158
- Abono verde, 113
- Abundancia relativa, 18-19
- Acame, 90, 97
- Actividad biológica, 112
- Acuíferos subterráneos, 8
- Acumulación de sales, 131
- Adaptación, 39, 40, 196
 a condiciones locales, 201
- Áfidos, 92, 231
- Agricultura
 camas elevadas, 127
 convencional, 215, 271, 281, 308
 de áreas inundadas, 126
 enfoque industrial, 4
 Hopi, 75, 84
 modernización de, 11
 orgánica, 239
 orgánica certificada, 308, 309
 orígenes de, 199
 roza-tumba-quema, 138
 sin riego, 82-84
 sostenible, 13, 15, 287, 319
 tradicional, 14, 267
 trashumante, 116, 141, 143, 275, 277, 278
- Agroecología, 13, 14, 303, 308, 315, 319, 327
- Agroecosistema, 17, 18, 24-28
 convencional, 303
 de roza-tumba-quema, 141
 de temporal, 78
 desarrollo sucesional de, 258
 diversidad del, 229-249
 límites espaciales del, 26
 mecanizada, 275
 pastoril, 279
 sostenible, 13
 tradicional, 207, 211, 219, 303, 305, 306, 326
- Agroforestería, 49, 54, 93, 112, 174, 237, 257, 260, 261, 290, 308
 roza-tumba y descanso, 239
- Agronomía, 14, 162, 229
- Agropyron repens*, 165
- Agroquímicos, 240
- Agrosilvicultura, 260
- Agrosilvopastoril, 261
- Agrostemina, 168
- Agrostemma githago*, 168
- Agua, 73, 82-83, 107, 122-123
 capacidad almacenamiento, 107
 capilar, 124
 movimiento de, 124
 cosecha, 84-85
 de hidratación, 123
 gravitacional, 123
 fácilmente disponible, 123
 higroscópico, 123
 vapor, 73
- Aguacate, 92
- Ahumado, 71
- Aire
 calidad, 48-49
 circulación, 92
 composición de, 90
 masas, 88
- Albedo de la superficie del suelo, 69
- Alcalinidad, 109
- Aleopatía, 154, 160, 161, 162, 167, 215, 222
 demostrando, 163
 historia del estudio de, 162
- Alelopáticos
 compuestos, 160, 163, 220, 225
 efectos
 de arvenses, 163
 de cultivos, 165-167, 220
 inhibición, 223
 interacciones, 160
 interferencia, 263
- Aleurotrachelus socialis*, 231
- Algas, 113
- Algodón, 203, 204
- Alimentos
 cadena alimenticia, 19
 patrones de consumo, 326
 políticas, 321
 producción sustentable, 12
 seguridad, 325
 sistema, 13, 323
 global, 319

- sostenible, 3223
red, 19
- Almidón, 32
- Altitud, 48
- Aluvión, 102
- Amaranthus*, 164
- Amaranthus retroflexus*, 164
- Amensalismo, 154
- Amonificación, 114
- Amonio, 22
- Análisis de los sistemas de información geográfica, 291
- Ananas comosus*, 266
- Anagrus epos*, 231
- Anegamiento, 78, 126
- Anemómetro, 92
- Angulo de incidencia, 62
- Animales, 279
- Antigostra* spp., 231
- Aplicación de fertilizantes inorgánicos, 3
- Aprovechamiento solar, 61
- Araña del Pacífico, 231
- Árboles, 68, 260
arreglos espaciales, 264
de manzana
el papel ecológico de, 261
- Arcillas, 103, 104
hidróxidos de, 103
silicatos de, 103
- Arena, 105
- Arroz, 58, 126, 127, 146, 205, 208, 211, 271, 279
- Artemisia tridentata*, 150
- Artrópodos, 147
- Arvenses, 187
interferencias benéficas de, 220
- Atmósfera, 87
- Australia, 83
- Autoecología, 17, 38, 153
- Autopolinización, 200
- Autótrofos, 19
- Avena fatua*, 167
- Aves, 293
- Azufre, 21, 37, 109
- Bacillus thuringiensis*, 204
- Bacterias, 109
- Bacteria *Rhizobium*
- Bancos de genes, 207
- Banco de semillas, 183
- Banco Internacional de Recursos Genéticos Vegetales, 211
- Bananos, 143
- Barbecho o descanso, 141, 239
de verano o periodo de descanso, 83
- Barreras de cultivos anuales, 96
- Beta vulgaris*, 163
- Biodiversidad, 9, 229, 238, 297
pérdida de, 289
regional, 294
- Biogeografía de las islas, 297
- Biología de la conservación, 289, 298
- Biomasa, 19, 20, 34, 35, 54, 241, 271, 272, 311, 312
animal, 273
cosechable, 254, 255
en pie, 258
- Biotecnología, 203, 322
investigación, 204
- Bordes o orillas en granjas, 293
- Boro, 23, 37, 131
- Bosque húmedo tropical, 12
- Brassica campestris*, 247
- Brassica kaber, 167
- Brassica* spp., 224, 231
- Brócoli, 192
- Bromeliaceae, 158
- Bromuro de metilo, 45, 285
- Bromus tectorum*, 188
- Cacao, 55, 68, 112, 143, 145, 154, 166
mazorcas de, 166
- Café, 55, 57, 203, 276
- Cajetes, 117
- Calabaza, 167, 225, 244
- Calcificación, 104
- Calcio, 37, 108
- Calentamiento catabático, 63, 88
- Calentamiento global, 60
- Calor, 21
energía calórica, 59
estrés calórico, 64
- Camas elevadas, 127
- Cambio dinámico, 23, 171, 175
- Camellones, 80
- Canadá, 83
- Caña, 33, 273
- Capa de inversión, 63
- Capa de labranza, 106
- Capa limite, 89
- Capacidad
de campo, 124
de carga, 23, 182
de colonización, 191
de intercambio, 108
de intercambio catiónico, 108
- Carbono o Carbón, 21, 34, 35, 60, 109, 262
capturado o fijado, 35
repartición o partición, 35
- Carlquist, Sherwin, 183

- Carne, 273, 279
- Casas de arco, 69
- Casas de sombra, 71
- Cebada, 205, 220
- Ceiba pentandra*, 261
- Celulosa, 32
- Ceniza, 144
- Centeno, 220, 221
- Centeno de invierno, 165
- Centro para Agroecología y Sistemas Alimenticias Sostenibles, 221, 309, 310
- Centros pioneros de desarrollo de la agricultura, 199
- Cercos vivos, 91, 230, 238
- Chaparral, 137
- Chenopodium album* (Quelite o Lambsquarters), 164, 224, 247
- Chicharo, 206
- China, 127, 284, 317
- Chinampas, 128
- Chinche café, 208
- Ciclo de Calvin, 32
- Ciclo de carbono, 22
- Ciclo hidrológico, 72
- Ciclos biogeoquímicos, 21, 229
- Citoesterilidad, 202
- Clases de textura, 105
- Clima (estado del tiempo), 43, 66, 73
- Climas Mediterráneos, 63, 81
- Clima monzón, 80
- Clímax, 24
 - etapa de, 252
- Clon, 203
- Cloro, 37
- Clorofila, 36
- Cloroplastos, 35
- CO₂, 90, 126
- Cobalto, 23
- Cobertura, 69, 71, 113, 123, 134
 - alelopática, 166
 - artificial, 134
 - orgánica, 134, 166
 - polvo, 83
 - rastrojo, 135
 - seca, 170
 - suelo, 135
 - viva, 69, 114, 219
- Coberturas de los surcos, 71
 - flotantes, 68, 69
- Cobre, 37, 38
- Cocos, 266
- Coexistencia, 158, 190, 216, 234, 236, 252
 - habilidad para coexistir, 217
- Col de Bruselas, 224
- Colchicina, 203
- Coliflor, 224
- Colocasia esculenta*, 128, 267
- Colocasia* spp., 174
- Colonización, 182
 - fases de la, 182, 245
- Coluvial, 102
- Combustibles fósiles, 3, 4, 26, 60, 77, 274, 280, 282, 283, 284
- Comensalismo, 154, 158
- Compactación, 107
- Compartir recursos, 243
- Competencia, 18, 23, 154, 161, 218, 230, 252
 - evasión de, 216, 243
 - interespecifica, 156
 - intraespecifica, 156
- Competidores, 188
- Complejidad, 171, 229
 - ambiental, 172
 - de interacción, 172
- Complejo ambiental, 171-177
- Composta o Compost, 114, 115, 239
- Compostaje, 114
- Comunidad, 18, 19
 - dominancia de la, 242
 - ecología de la, 18
- Condensación, 74
- Conocimiento agrícola, 325, 328
- Conocimiento cultural, 211
- Conservación del agua, 8
- Conservación *in situ*, 211
- Consumidores, 19
- Contaminación, 8-9
 - agua, 8
- Control biológico, 160, 191
 - agentes de, 294, 308
 - de insectos plagas, 191
- Control de la erosión, 293
- Control del conocimiento agrícola y de los recursos, 325
- Control químico de plagas, 3
- Cordia alliodora*, 56
- Costa Rica, 266, 267, 295
- Corredores riparios, 289, 292
- Cromosomas, 197, 203
- Cuajada de soya, 110
- Cualidades emergentes, 18, 215, 229, 230, 263
- Cucumis sativa*, 167
- Cultivares o cultivos, 205
- Cultivo en pie, 21, 312
- Cultivos
 - adaptados a tierras húmedas, 127
 - anuales, 96
 - con descanso, 133
 - con mayores requerimientos de agua, 133

- de árboles, 256
- de cobertura, 113, 223, 238, 284
 - multiespecies, 223
- de tejido, 203
- en franjas, 237
- intercalados, 81, 133, 159, 210, 224, 230, 237, 242, 243, 284
 - sistemas, 192, 193, 241
- menores, 212
- múltiples, 217, 237, 308
- transgénicos, 203
- Cydia pomonella*, 231
- DDT, 9
- Daño por heladas, 65, 71
- Darwin, Charles, 218
- Descomponedores, 21
- Deforestación, 60
- Deformación, 89
- Delta del río Yangtze, China, 317
- Demografía de plantas, 181
- Densidad aparente, 107, 112, 221
- Dependencia de los insumos externos, 9
- Depósito de sal, 91
- Depredación, 155
- Depredores, 19
- Desarrollo sucesional, 235, 255, 258, 284
- Descenso de aire frío, 63
- Descomponedores
- Desertificación, 91
- Dsecación, 89
- Desierto de Negev, 83
- Detritívoros, 21
- Detrito, 252
- Dióxido de carbono, 21, 22, 31-33, 60
- Diseño de rompeviento, 96
- Dispersión, 181
 - barreras a la, 183
- Diversidad, 230, 236, 240, 241, 254, 304
 - alfa, 233, 234, 237
 - beta, 233, 234, 238
 - biológica, 12, 13
 - de cultivos, 240-245
 - de especies, 18, 24, 189, 253, 313
 - índices de, 241-242
 - ecológica, 232-240
 - el índice de Margalef
 - en ecosistemas naturales, 233-235
 - gama, 233, 291, 296
 - métodos para aumentar, 237
- Domesticación, 198
- Dominancia, 18, 19
- Dosel, 49
- Drenaje de aire frío, 64
- Dust Bowl*, 91
- Ecología, 14, 289, 298, 316
 - agrícola, ecología de cultivos, agroecología, 14
 - de cultivos, 14, 38
 - evolutiva, 156
 - ecofisiológica, 17
- Economía de mercado, 317, 321
- Ecosistema, 17
 - acuático, 77
 - cuantificación de características, 316
 - diversidad del, 229
 - natural, 17, 24, 26, 289, 292, 295-297, 303
 - diversidad en, 233-235
 - fragmentos, 294
 - nivel, 229
 - subterráneo, 259
- Ecotipo, 198
- Ecotono, 294
- Efecto coriolis, 88
- Efecto de borde, 294
- Efecto invernadero, 59, 69, 71
- Eichornia crassipes*, 70
- Eisenia foetida*, 115
- Elementos escasos, 37
- Elkhorn Slough, California, 296
- Ellis, Erle, 317
- Enanismo, 89
- Endurecimiento, 65
- Energéticos, 271-287
- Energía, 271
 - biológico-cultural, 274, 283
 - calórico, 271
 - cinética, 271
 - eólica (turbinas de viento), 283
 - flujo, 20, 24, 27, 235, 252, 316
 - fuentes renovables de, 307
 - humana, 283
 - industrial-cultural, 274, 283
 - insumos, 274-277
 - biológico-culturales, 274-277
 - culturales, 274-277
 - ecológicos, 274
 - potencial, 271
 - química, 31
 - solar, 21, 31, 51, 271, 272
 - captura de, 20, 272-274
 - uso sostenible en los agroecosistemas, 282
- Enfermedades, 92
 - manejo de, 256
- Enfermedad de la papa Irlandesa, 207
- Enfoque industrial de agricultura, 4

- Enfriamiento adiabático, 72
- Entradas naturales, 23
- Entropía, 272
- Eotetranychus willamette*, 231
- Epífila, 158
- Epífita, 158
- Epifitismo, 158, 161
- Equidad social, 325
- Equilibrio dinámico, 24, 26, 254
- Erosión, 7
 - control de la, 293
- Erythrina poeppigiana*, 57
- Erythroneura elegantula*, 231
- Especiación, 198
- Especialistas, 40, 189
- Especies
 - animales nativas, 293
 - de plantas ruderales, 253
 - domesticadas, 195
 - dominantes, 18
 - silvestres, 9
- Espectro electromagnético, 43
- Espinas, Alfred, 218
- Estabilidad, 19-20, 24, 25, 26, 229-249, 230, 233, 254, 256
- Establecimiento, 181, 184
- Estaciones del año, 47-48
- Esterilidad masculina, 202
- Estiércol, 114
- Estomas, 32, 33, 38, 89, 121
- Estrategas-r, 185
- Estrategas-K, 185
- Estrategias de historia de vida, 185, 188
- Estrés, 188
 - tolerantes, 188
- Estructura
 - de la vegetación, 19
 - del dosel, 49-50
 - grumosa, 104-106, 112, 122
 - trófica, 19-20
- Etapas de climax, 253
- Etapas iniciales de la sucesión, 255
- Eutroficación, 9
- Evaporación, 74, 122
 - perdidas por, 132
- Evapotranspiración, 74, 78, 128, 261
 - eficiencia de, 132
 - potencial de, 78, 131
- Evolución, 196
- Exclusión competitiva, 189, 217
- Extinción, 198
- Faba
- Fabaceae, 159
- Factores
 - abióticos, 17
 - bióticos, 17, 153-169
 - compensadores, 175
- Fagopyrum esculentum*, 167
- Fall armyworm
- Farrell, John, 262
- Fenotipo, 196
- Fertilizantes o abonos, 109, 280, 292, 320, 326
 - inorgánicos, 3, 26, 37, 38, 317
 - químico sintéticos, 4, 7
 - aplicación de, 4
- Fijación de carbono, 33, 35
- Fijación de nitrógeno, 108, 216, 307, 317
- Fijadores de nitrógeno
 - bacteria, 216, 221
 - cultivos, 284
 - cultivos de cobertura, 308
- Finca Loma Linda, Costa Rica, 295
- Fitocromo, 53
- Fitomejoradores, 210
- Fitomejoramiento o hibridación, 167
- Fitotoxinas, 165
- Floema, 35
- Fosfato, 22, 37, 108, 110
- Fósforo, 21, 23, 36, 109, 110, 262
 - ciclo del, 23, 110
 - en forma orgánica, 110
- Fotofosforilación, 32
- Fotografía aérea, 291
- Fotoperíodo, 47, 53
- Fotorespiración, 31, 32
- Fotosintato, 31
- Fotosíntesis, 19, 31, 32, 34, 43, 46, 51, 64, 90, 190, 252, 272
 - C3, 32-33
 - C4, 33
 - MAC, 33
- Fotosintética
 - eficiencia, 51
 - proceso (metabolismo), 54, 190
 - tasa, 34, 35, 50-52
- Fototropismo, 53
- Fragmentación, 254, 259
 - ecología de, 296
- Fresas, 69, 295
- Frijol campana o haba (*Vicia faba*), 113, 221
- Frijol terciopelo (*Mucuna puriens*), 166
- Frijol, 164, 211, 260
- Fuego, 137-151
 - de corona, 138, 139
 - dependencia, 137
 - resistencia, 141
 - subterráneo, 139

- superficial, 138
tolerancia, 141
uso en limpieza del terreno, 143
y nutrimentos, 145
- Funguicidas, 5
- Gametos, 197
- Gases invernadero, 59
- Generalistas, 40, 189
- Genes, 203
- Genética
diversidad, 205, 206, 209
pérdida de, 9-10, 204, 209
reducción de, 209
erosión, 205, 206
homogeneidad, 10
ingeniería, 6, 204
manipulación de plantas cultivadas, 3
molecular, 203
recombinación, 233
reserva, 10
uniformidad, 202, 204, 208
variabilidad, 197, 201
vulnerabilidad, 205, 206
- Genoma vegetal, 5-6
- Genotipo, 196
- Germinación, 52, 172, 173
- Girasoles, 96
- Gleización, 104, 105
- Glucosa, 31, 32
- Glucosinolatos, 223
- Glycidia sepium*, 158
- Gmelina*, 56
- Gmelina arborea*, 257
- Granjas tradicionales, 15, 237, 305
- Grava, 105
- Guano, 114
- Gusano elotero, 231
- Gusano soldado, 231
- Gusano telarañero, 231
- Hábitat, 38, 39, 40, 189
diversidad, 27
fragmentación, 291
fragmentos, 289, 292
- Harina de pescado, 114
- Helecho, 147
- Heliantus annuus*, 96
- Heliothis zea*, 231
- Helminthosporium maydis*, 208
- Herbicidas, 5, 9, 116, 223
- Herbívoros, 19, 21, 207, 210
- Herbivorismo, 157, 161
- Herodotus, 218
- Heterogenidad, 171
ambiental, 171-172
espacial, 171
- Heterosis, 202
- Heterótrofos, 19
- Hibridación, 167, 202
- Híbridos, 206, 208
semillas, 6, 9, 26, 202
vigor, 202
- Hidratación, 103
- Hidrógeno, 36
- Hidrólisis, 103
- Hidroplantas, 283
- Hierro, 23, 37
- Hileras de arbustos, 91, 230, 238
- Hipótesis de perturbación intermedia, 254, 259
- Holanda, 128
- Hordeum secale*, 167
- Hordeum vulgare*, 220
- Horizontes del suelo, 103
horizonte A, 104, 111
horizonte B, 104
horizonte C, 104
horizonte O, 104, 105
horizonte R, 104
- Huertos, 96, 238
- Huerto casero o huerto familiar, 55, 174, 237, 264, 265, 266
agroecosistemas, 226, 237, 266
chino, 312
tropical, 264
- Humatos, 115
- Humedad, 73
relativa, 73
- Humificación, 111
- Humus, 102, 111, 252
- Imperata*, 188
- Índice
de área foliar, 49, 52, 55
de diversidad de Margalef, 241
de producción agrícola por capita, 7
de Shannon, 242
de Simpson, 242
- Individuo, 17
- Industrialización, 11
- Inequidad, 11
- Infiltración, 121
- Influencia continental, 62
- Influencia marítima, 62, 64
- Iniciativa de la biosfera sostenible, 298
- Insectos
benéficos, 222

- colonización, 246
- herbívoros, 225
- Insolación, 59, 62
- Insumos externos antropogénicos, 26
- Insumos agrícolas, 9
- Intemperismo
 - físico, 102
 - químico, 103
- Intemperización, 102, 103
- Interacción de factores ambientales, 171-172
- Interacciones bióticas, 262
- Interacciones de especies, 215-227, 316
- Interferencia, 155, 160, 161, 189, 215-218, 242, 243, 252
 - adición, 155, 157-159, 215
 - alelopática, 263
 - benéfica, 236
 - competitiva, 220
 - mutualistas benéficas, 219-220
 - remoción 155-157, 215
- Intrusión salina, 5
- Invernaderos, 71
- Inversión, 64
- Investigación agrícola, 321
- Iones disueltos, 108
- Islas, 245, 297
- Israel, 83, 94
- Istmo de Tehuantepec, 89, 97

- Juglans nigra*, 154
- Juniperus deppeana*, 261

- Labor (tracción) animal, 280
- Labranza, 116, 146
 - alomada, 118
 - cero
 - excesiva, 107
 - intensiva 3-4, 7
 - mínima, 239, 308
 - reducida, 116, 134, 283
 - sistemas, 116
 - técnicas, alternativas, 116
- Lanzallamas, 147
- Laterización, 104, 105
- Latitud, 48
- Leche, 273, 279
- Lechuga, 192
- Leguminosas, 113, 154, 159, 226, 231, 236, 256
- Lemna* spp., 70
- Ley de Gause, 189
- Limo, 105
- Limpieza de terreno, uso del fuego para, 143
- Lixiviación, 109
 - perdida por, 221

- Llanuras de Serengeti, 157
- Lluvia
 - ácida, 77
 - ciclónica, 75-76
 - convectiva, 75
 - estacional, 81
 - orográfica, 75
 - patrones, 76-78
- Lodos residuales, 115
- Lolium temulentum*, 162
- Lupinus* spp., 167
- Luz, 43-58
 - ambiental, 43, 54, 55, 261
 - calidad, 47
 - competencia por, 52
 - de sombra, 50
 - infrarroja, 43, 44, 46
 - intensidad, 47, 50
 - manejo de, 54
 - punto de compensación, 47, 52
 - reacciones, 31
 - tasa relativa de transmisión de luz, 49
 - transmitida, 44
 - ultravioleta, 43, 44, 45
 - visible, 43, 44

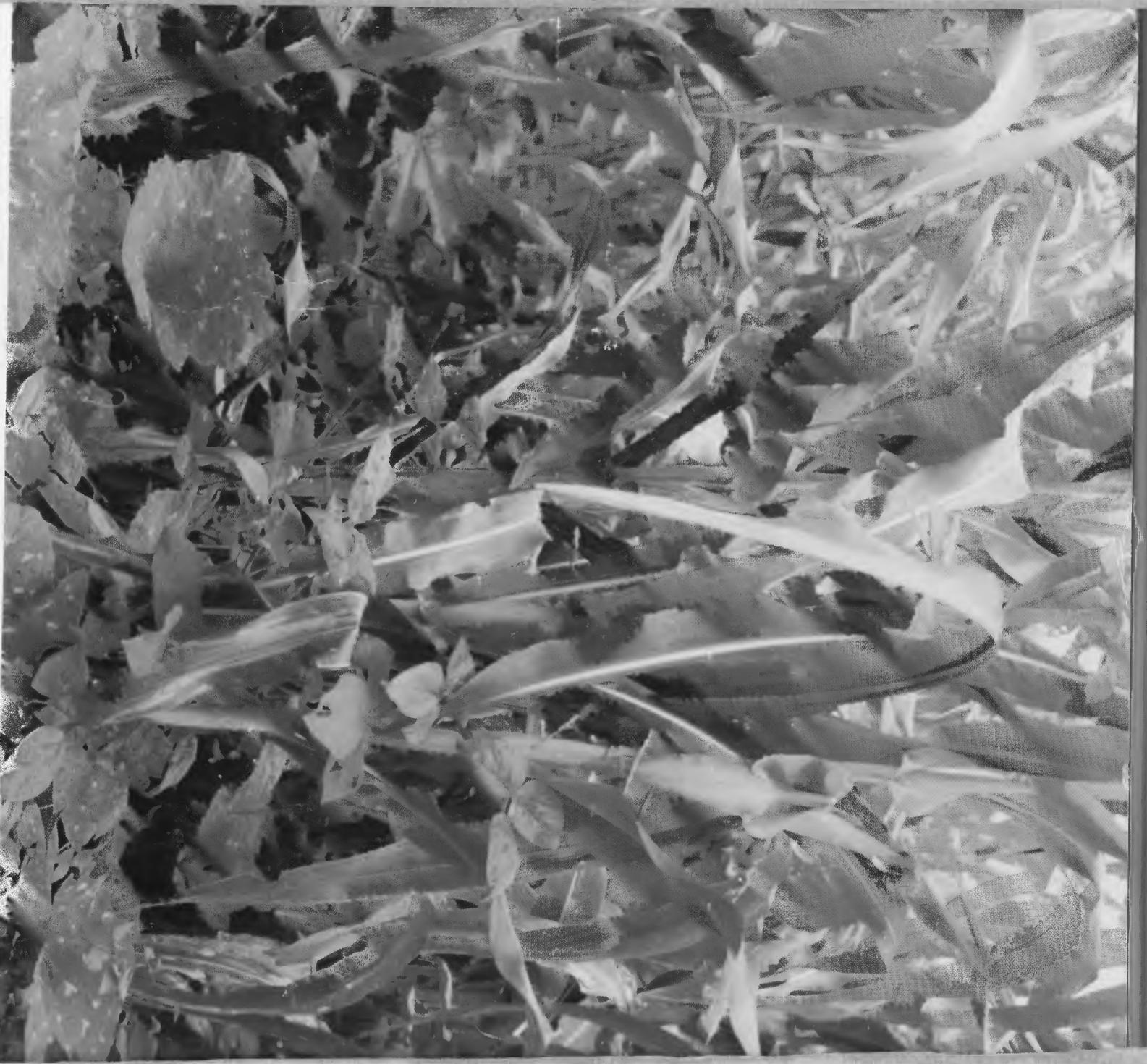
- Macronutrimiento, 21, 36, 37
- Madremyia saundersii*, 224
- Madurez, 254
- Magnesio, 23, 37
- Maíz, 33, 55, 57, 78, 79, 84, 96, 201-206, 225, 244, 260, 262, 275, 276, 278, 279, 280
- Maíz-frijol-calabaza intercalados, 55, 80, 144, 225, 236, 244
- Maíz-frijol-calabaza en policultivo, 81, 217, 225, 236, 244
- Malanga, 267
- Manejo
 - a nivel de paisaje, 292
 - de arvenses, 142
 - de la fertilidad, 118
 - de las enfermedades de las plantas, el efecto de
- fuego, 148
 - de heladas, 96
 - de plagas, 230, 256
 - biológico, 284
 - integrado, 181, 283, 297
 - de sombra, 56
 - del sistema completo, 230
- Manganeso, 23, 37
- Manihot esculenta*, 257, 266
- Mantos acuíferos, 4
 - contaminación de, 9
 - para irrigación, 12
- Manzanas, 223

- Marceño, 78
- Materia orgánica, 4, 7, 21, 58, 70, 81, 102, 104, 108, 109, 114, 118, 139, 221, 230, 238, 239, 252, 261, 282, 307
contenido, 106, 313
- Material parental, 104
- Materiales de cobertura, no derivados de especies vegetales, 71
- Maya, 129
- Mazorcas de cacao
- Mecanismos de retroalimentación, 182
densodependiente, 182
densoindependiente, 182
- Mején, 79
- Metano, 126
- México, 78, 80, 82, 112, 117, 125, 143, 238, 261, 265, 267, 293, 294
- Micorriza, 159, 225
- Microclima, 8, 48, 64, 66, 67, 216
- Microhábitat
diferenciación de, 230, 236
variaciones en, 174
- Micronutriente, 23, 37
- Microorganismos, 102
- Milo, 96
- Milpa de año, 82
- Minador de la hoja de la uva, 231
- Mineralización, 102, 111
- Molibdeno, 23, 37
- Molino de viento, 98
- Monocultivo, 3, 4, 242, 243, 292
- Mosaico sucesional, 259
- Mostaza silvestre, 191, 223, 246-247
- Mucuna puriens*, 166
- Muérdago o matapalo, 156
- Mutación, 197, 233
- Mutualismo, 23, 153, 154, 159, 161, 216, 217, 218, 230, 232, 234, 240
facultativo, 218
habitacional, 218
indirecto, 218
no-habitacional, 218
- Nanjing Instituto de Ciencias Ambientales, 284
- Naranja, 206
- Native Seeds/SEARCH, 212
- Neutralismo, 154
- Nicho
amplitud, 189
complementariedad, 193
diferenciación, 190
diversificación, 190, 217, 234, 236
ecológico, 39, 40, 181, 188, 245
extensión, 189
potencial, 189
realizado, 189
traslape, 40
- Niebla, 73
- Nitrato, 22, 106
- Nitrato de amonio, 109
- Nitrógeno, 21, 36, 109, 139, 146, 159, 216, 222, 223, 238, 262, 281, 317
atmosférico, 22
ciclo, 22, 231, 282
fijado, 22, 159, 225
- Nivel trófico, 19
- Nogal negro (*Juglans nigra*), 154
- Nueva Zelanda, 93
- Nutrientes, 21, 221
ciclo de, 20, 21-23, 24
disponibilidad de, 109, 252
limitante, 109
lixiviación, 282
manejo de, 109
reciclaje de, 24, 223, 230, 234, 235, 239, 261, 305, 316, 317
vegetales liberados por el fuego, 146
- Ochidaceae, 158
- Odum, E.P., 153, 154
- Oliva, 129
- Organismo
- Organismos benéficos
del suelo, 230
no agrícolas, 209, 221, 238, 294
- Organismos plaga, supresión de, 221
- Orientación de las pendientes, 48
- Origen de las Especies, El*, 218
- Oryza sativa*, 127
- Osmoregulación, 37
- Ovejas, 133
- Oxidación, 103
- Oxígeno, 21, 31, 36, 90, 109, 126
- Ozono
capa, 44
disminución, 45
gas, 45
- pH, 108, 109
- Paisaje
biodiversidad, 297
diversidad, 293
ecología del, 291
fragmentado, 254
- Paisaje agrícola, 289
- Palomilla, 231, 310
- Palomilla dorso de diamante, 231
- Panicum* spp., 167

- Papas, 204, 206, 211, 273
 Papel trófico, 19
 Paradigma de manejo, 229
 Parasitismo, 154
 Parasitoides, 19, 155
 Parásitos, 19, 156
 Parientes silvestres, 209, 210, 293
Paspalum conjugatum, 164
 Pasto, 164, 216
 Pasto Sudán, 165
 Pastoreo, 275
 Pastos perennes nativas, 295
 Pastura, 83
 Patógenos, 207
 Paulus, James, 223
Pennisetum americanum, 96
 Percolación, 122
 Pérdidas por evaporación, 134
 Perfil microclimático, 67
 subterráneo, 67
 Perturbación, 19, 24, 183, 188, 234, 235, 251-270
 escala de, 252
 frecuencia de, 252
 intensidad de, 252
 intermedia, 254
 y recuperación, 251
Phaseolus vulgaris, 164
Phyllotreta cruciferae, 231
Phytophthora infestans, 207
Phytophthora, 207
Pieris rapae, 224
 Piña, 32, 166
 Pinaceae, 159
 Piso de arado, 112
Pithecelobium saman, 145
 Plagas, resistencia a, 26
 Plaguicidas químicos, 5, 8
 Plaguicida, 26, 200, 207, 240, 281, 292, 320, 322, 326
 adicción, 5
 resistencia, 5, 200
 Plantas C3, 32, 33, 34, 51
 Plantas C4, 32, 33, 34, 51
 Plátanos, 143
Phutella xylostella, 231
 Población, 17
 crecimiento, 7, 326
 curva, 182
 dinámica, 317
 ecología, 14, 17, 181
 regulación de, 23
 Podzolización, 104
 Policultivo de maíz-frijol-cucúrbita
 Policultivo, 161, 218, 226, 237, 243
 de monocultivos
 Polinización, 154, 216, 218
 abierta, 201
 cruzada, 200
 Poliploid, 197
 Poliploides, 197, 203
 Inducidos, 203
 Polvillo de paja, 98
 Potasio, 36, 37, 108, 109
 Pound, Roscoe, 218
 Practicas sostenibles, la conversión a, 306-307
 Precipitación, 73, 74-78
 Precipitación ácida, 77
 Proceso de descomposición, 21
 Proceso de reproducción diferencial, 198
 Proceso de recuperación, 252
 Producción, 311
 de carne de res, 275
 de fresas, 284-287
 de granos por persona, 6
 piscícola, 128
 orgánica, 308, 310
 primaria, 272
 Productividad, 11, 241, 254, 311
 índice, 312
 primaria bruta, 21
 primaria neta, 21, 255, 258, 272, 312
 anual, 259
 Productores primarios, 19
 Productos de origen animal, 280
 Protectores de viento, 93, 264
 Proteínas, 36, 273, 276
 Protocooperación, 154, 158, 160, 161
Prunus capuli, 261
Pteridium aquilinum, 147
 Pulga saltona, 231
 Punto de compensación del CO₂, 32, 65
 Punto permanente de marchitez, 124
 Punto de rocío, 73
 Punto de saturación, 47
 Quelite (*Chenopodium album*), 164, 224, 247
 Quema intencional, 150
 Química fitotóxica, 162
 Quintana Roo, México, 129
 Rábano, 247
 Radiación fotosintéticamente activa, 46
 Radiación solar, 43, 59, 61
 Radical libre de oxido de cloro, 45
 Raíces, 125
Raphanus sativa, 167, 247
 Razas criollas, 201, 206, 211
 localmente adaptadas, 211

- Reacciones oscuras, 31
- Regolita, 103
- Relación C/N (carbono/nitrógeno), 146
- Relación simbiótica, 154
- Relaciones micorrizicas, 307
- Relaciones mutualistas, 217, 254
- Relaciones tróficas, 188
- Rendimiento sostenible, 12
- Repartición de los recursos, 217
- Reproducción, 185
 - diferencial, 198
 - sexual, 197
- Reservas de granos, 6
- Residuos de cultivos, residuos vegetales, 70, 113, 114, 134
 - quemados, 71
- Residuos húmicos, 111
- Resiliencia, 26
- Resistencia
 - al frío, 65
 - ambiental, 200
 - horizontal, 211
 - nivel de sistema, 211
 - perdurable, 210
 - vertical, 210
- Respiración, 21, 32, 33, 35, 47, 64, 252
- Respuestas, 39
 - dependientes, 39
 - desencadenamiento, 39
 - independientes, 39
- Restauración, 321
- Revolución verde, 6, 57, 322
- Rhizobium*, 154, 159, 164, 218, 219, 221, 231
- Rhopalosiphum maidis*, 231
- Riego o irrigación, 3, 4-5, 7, 9, 71, 73, 86, 129, 200, 282
 - agua, 26, 74, 292
- Riqueza de especies, 241
- Rompevientos, 92-96, 264, 284
- Rotación de cultivos, 160
- Rotaciones, 238-239
 - cortos, 3
- Roya del maíz, 208
- Rubus* spp., 231
- Ruderales, 187, 188
- Ruiz-Rosado, Octavio, 247
- Sales, 109
- Salinidad, 109
- Salinización, 86
- Saltación, 91
- Santa Cruz, California, 82
- Secale cereale*, 165, 222
- Selección de líneas puras, 202
- Selección dirigida, 198
 - métodos de, 200
- Selección-K, 185
- Selección masiva, 201, 205
- Selección natural, 156, 196, 198, 210, 233
- Selección-r, 185
- Selenio, 131
- Silvopastoril, 261
- Simbiosis, 154, 158
- Sinecología, 153
- Sirfidos, 224
- Sistema de campos elevados, 129
- Sistemas
 - agroforestales, 53, 54, 67, 116, 260-269
 - de cultivos tradicionales, 209
 - de drenaje, 127
 - de granjas tradicionales, 14, 237, 305
 - de pastoreo, 85, 150
 - sociales, 303, 306
- Sitio seguro, 172, 191
- Sobre-rendimiento, 192
- Sobresiembrá, 55
- Sociedad Americana de Ecología, 298
- Sorghum bicolor*, 96
- Sorghum sudanense*, 165
- Sorgo, 96, 202
- Sostenibilidad, 12, 13, 15, 18, 26, 118, 210, 219, 226-227, 229, 235, 240, 247, 268, 292, 301, 303-318, 305, 311, 313, 319
 - conversión a, 309
 - indicadores de, 303, 313, 317
- Soya, 246
- Spergula arvensis*, 224, 247
- Spodoptera frugiperda*, 231
- Subproductos agrícolas, 114
- Sucesión, 24, 251-269, 253, 254, 255, 268, 293
 - ecológica, 251
 - manejo, 256
 - primeras fases de, 252
 - primaria, 251
 - secundaria, 234, 251
- Suelo, 101-119, 239
 - acidez, 108
 - agregación, 107
 - agregados, 106
 - alcalino, 109
 - anegados, 126
 - biota, 238, 307
 - compacción, 112, 221
 - conservación, 117
 - deficiencia de agua, 128
 - degradación, 7
 - ecosistema, 256
 - enmiendas, 115

- eólico, 102
 - erosión, 4, 5, 8, 86, 93, 221, 238, 239, 282, 320
 - estructura, 122
 - exceso de agua en el, 126
 - glacial, 102
 - horizontes, 103
 - humedad, 121, 124
 - contenido, 124
 - disponibilidad, 123
 - manejo, 121, 132
 - manejo, 117, 118
 - sostenible, 118
 - materia orgánica, 111-112
 - manejo, 112-116
 - microorganismos, 111
 - movimiento lento del, 91
 - perfil, 103
 - pH, 262
 - residual, 101
 - solución, 36, 37, 103, 123
 - superficial o capa arable, 101
 - temperatura, 69
 - transportado, 102
- Tabasco, México, 79, 82, 112, 125, 128, 143
- Taquinos, 224
- Taro o malanga, 128, 174
- Técnicas de cruzamiento, 6
- Tecnología, 322
- Teología natural, 218
- Teoría de la biogeografía de las islas, 229, 245
- Teoría del nicho, aplicaciones para la agricultura, 190-193
- Temperatura, 59-72
 - extrema, adaptaciones a, 65
 - microclima, modificación, 67
 - variación, patrones de, 61-64
 - variaciones diarias en, 66
- Termodinámica, 271
 - primera ley de, 271, 280
 - segunda ley de, 272
- Termoperíodo, 65
- Terrazas, 117
- Tiempo, 43, 73
- Tierra arable, 12
- Tierras húmedas/humedales, 9, 78, 86, 128, 289, 293
- Tlaxcala, México, 80, 117, 238, 261, 267, 293, 294
- Tolerancias, 39
- Tolerantes, 188
- Tomates, 82
- Tonalmil, 82
- Topografía, 48
- Tormenta ciclónica, 75
- Toxina Bt, 204
- Trabajo humano, 277
- Transpiración, 36, 38-39, 74, 121, 123
 - eficiencia de, 132
 - tasas, 131
- Trébol, 216
- Trichogramma*, 155
- Trichoplusia ni*, 224
- Trigo, 112, 133, 205, 211, 273, 276
- Triticum aestivum*, 203
- Tuxpan, 98
- Uniformidad de especies, 242
- Universidad de California, Santa Cruz, 221, 222, 246, 284, 309, 310, 323
- Uso de energía
 - biológica cultural, 274-277
 - eficiencia en, 275, 307
 - industrial cultural, 274-277
- Uso de fuego para limpieza de terrenos, 143
- Uso equivalente de la tierra, 225, 243, 245
- Valor de importancia, 241
- Van Beneden, Pierre, 218
- Vanilla, 55, 158
- Vanilla fragrans*, 158
- Variación fenotípica, 197
- Variación genotípica, 197, 201
- Varietal sintética, 202
- Varietales de alto rendimiento, 205
- Vegetación amortiguadora, 238
- Vegetación natural, 293
- Vermicompost, 115
- Vernalización, 66
- Vicia faba*, 113, 220, 222
- Viento, 87-99
 - energía, 283
 - erosión, 89-90
 - montaña, 88
 - pendiente, 88
 - poder, 98
 - predominante
 - valle, 88
 - velocidad, 94
- Vientos de Santa Ana, 89
- Viñedos, 96
- Xanthosoma* ssp., 170
- Yuca, 144, 257, 266
- Zanjas, 80
- Zea mays*, 96
- Zinc, 23, 37
- Zonas amortiguadoras (de amortiguamiento), 238, 295, 296



AGRUCO
UMSS-FCAP / IC-OSSUDE



UCSC

