

Una base agroecológica para el diseño de sistemas diversificados de cultivo en el Trópico

Miguel A. Altieri¹
Clara I. Nicholls¹

RESUMEN. Los sistemas diversificados de pequeña escala, que utilizan principalmente recursos locales y combinaciones complejas de los cultivos, son relativamente estables y productivos, y presentan rendimientos altos por unidad de trabajo y energía. Los policultivos complejos y los sistemas agroforestales practicados por pequeños productores tropicales imitan varios aspectos de la estructura y el funcionamiento de las comunidades naturales, como el reciclaje de nutrientes, resistencia al ataque de plagas, estructura vertical y altos niveles de biodiversidad.

Un enfoque agroecológico para mejorar los sistemas agrícolas pequeños en el Trópico debe asegurar que los sistemas y tecnologías que promueve sean apropiados para las condiciones ambientales y socioeconómicas específicas de los pequeños productores, sin incrementar su dependencia de insumos externos. Los proyectos de desarrollo agroecológico deberán incorporar elementos del conocimiento agrícola tradicional y la ciencia agrícola moderna, incluyendo sistemas que conserven los recursos y a la vez sean muy productivos, tales como los policultivos, la agroforestería, y los sistemas que integran cultivos y animales.

Resulta ecológicamente útil promover monocultivos mecanizados en áreas con una biota compleja, donde las plagas abundan durante todo el año y la lixiviación de nutrientes es un obstáculo considerable. En estos casos, es más ventajoso imitar los ciclos naturales en lugar de tratar de imponer ecosistemas simplificados en áreas donde son naturalmente complejos. Por esta razón, muchos investigadores creen que los ecosistemas sucesionales son modelos particularmente apropiados para el diseño de agroecosistemas tropicales sostenibles.

Palabras clave: agroecosistemas tropicales, biodiversidad, manejo de plagas, mimetismo de ecosistemas.

ABSTRACT. An agroecological basis for designing diversified cropping systems in the tropics. Small scale diversified systems, which rely mostly on local resources and complex crop arrangements, are reasonably productive and stable, exhibiting a high return per unit of labor and energy. Complex polycultures and agroforestry systems used by small tropical farmers mimic the structure and function of natural communities in many ways, therefore acquiring many features typical of such communities, such as tight nutrient cycling, resistance to pest invasion, vertical structure, and high levels of biodiversity.

An agroecological approach to improve tropical small farming systems must ensure that promoted systems and technologies are suited to the specific environmental and socio-economic conditions of small farmers, without increasing risk or dependence on external inputs. Rather, agroecological development projects should incorporate elements of traditional agricultural knowledge and modern agricultural science, featuring

resource-conserving yet highly productive systems such as polycultures, agroforestry, and the integration of crops and livestock.

It is ecologically futile to promote mechanized monocultures in areas of overwhelming biotic intricacy where pests flourish year-round and nutrient leaching is a major constraint. Here, it pays to imitate natural cycles rather than struggle to impose simplistic ecosystems on ones that are inherently complex. For this reason, many researchers think that successional ecosystems can be particularly appropriate templates for the design of sustainable tropical agroecosystems.

Key words: biodiversity, ecosystem mimicry, pest management, tropical agroecosystems.

¹ Division of Insect Biology, University of California. 201 Wellman Hall, Berkeley, California 94720, **EUA**. agroeco3@nature.berkeley.edu, nicholls@uclink.berkeley.edu

Introducción

De todas las regiones donde se practica la agricultura, es en el Trópico donde más urgen los sistemas novedosos de producción. Esta región no se ha beneficiado significativamente de las tecnologías modernas que condujeron a una elevada productividad agrícola en las regiones templadas. La precipitación abundante y las altas temperaturas promueven la competencia de malezas, los brotes de plagas y la lixiviación de nutrientes que enfrentan constantemente las grandes plantaciones y los monocultivos anuales que cubren grandes extensiones de los Trópicos (Beets 1990).

En muchas regiones tropicales, la agricultura está muy mecanizada, lo cual conlleva la simplificación de la estructura ambiental de grandes extensiones, donde se reemplaza la diversidad natural por un número reducido de plantas cultivadas y animales domésticos. Predomina la homeogeneidad genética, ya que los monocultivos dependen de unas pocas variedades de cultivos. Algunos investigadores han advertido repetidas veces acerca de la extrema vulnerabilidad asociada con la uniformidad genética, afirmando que la simplificación ecológica en la agricultura está estrechamente relacionada con los ataques de plagas (Adams *et al.* 1971, Robinson 1996). Muchos científicos argumentan que la drástica reducción en la diversidad de plantas cultivadas ha puesto en peligro la producción de alimentos en el Trópico. En vano, los productores han tratado de superar estas barreras bióticas aplicando grandes cantidades de fertilizantes y plaguicidas químicos, pero esta solución se ha visto limitada por el alto precio de los combustibles fósiles, y sobre todo por el contragolpe ecológico manifestado en externalidades ambientales y de salud significativas (Conway 1997).

Por otro lado, los pequeños agricultores —especialmente los que habitan ambientes marginales, ignorados por la modernización agrícola— no han recurrido a los agroquímicos para mantener su producción. Aunque las estimaciones varían considerablemente, aproximadamente 1,9 a 3,3 billones de agricultores rurales del mundo en desarrollo no han sido alcanzados directamente por las tecnologías agrícolas modernas. En su mayoría son campesinos, indígenas y pequeñas familias rurales, que siguen cultivando los valles y laderas de los paisajes rurales con métodos tradicionales o de subsistencia. Cerca de 370 millones de ellos son extremadamente pobres, y sus medios de subsistencia dependen de los ambientes marginales y

propensos al riesgo del Hemisferio Sur (Conway 1997). La mayoría de estas personas cultivan sistemas diversificados de pequeña escala, que dependen de recursos locales y de arreglos complejos de cultivos. Se ha demostrado que dichos sistemas son productivos y estables, y presentan un rendimiento elevado por unidad de trabajo y energía (Netting 1993). En Latinoamérica, por ejemplo, las unidades campesinas de producción alcanzaron los 16 millones a finales de los 80, ocupando cerca de 60,5 millones de hectáreas, o 34,5% del total de la tierra cultivada, aproximadamente 175 millones de hectáreas (De Grandi 1996). La población campesina incluye 75 millones de personas, casi dos tercios de la población rural latinoamericana (Ortega 1986). El tamaño promedio de estas unidades es de 1,8 ha, aunque la contribución de la agricultura campesina a la oferta general de alimentos en la región es considerable. En los 80, alcanzó aproximadamente el 41% de la producción agrícola para el consumo doméstico, y es responsable de la producción del 51% del maíz (*Zea mays*), 77% del frijol (*Phaseolus spp.*) y 61% de la papa (*Solanum tuberosum*) en la región.

En la búsqueda de alternativas para desarrollar agroecosistemas más sostenibles, varios investigadores han planteado que los agroecosistemas tropicales deberían imitar la estructura y el funcionamiento de las comunidades naturales (práctica seguida durante siglos por miles de agricultores indígenas), ya que estos sistemas exhiben un ciclaje de nutrientes bastante cerrado, resistencia a la invasión de plagas, estructura vertical y conservan la biodiversidad (Ewel 1986, Soule y Piper 1992).

Si se adopta este enfoque agroecológico, se debe garantizar que los sistemas y tecnologías que se promueven sean apropiados para las condiciones ambientales y socioeconómicas específicas de los pequeños agricultores, sin incrementar su dependencia de insumos externos. Los proyectos de desarrollo agroecológico deberían incorporar elementos del conocimiento agrícola tradicional y la ciencia agrícola moderna, incluyendo sistemas que conserven los recursos y a la vez sean productivos, tales como los policultivos, la agroforestería, y los sistemas que integran cultivos y ganado (Altieri 1995).

Se ha demostrado de manera contundente la futilidad ecológica de promover monocultivos mecanizados en zonas tropicales con una biología muy intrincada, donde las plagas abundan a lo largo del

año y la lixiviación de nutrientes es un problema serio (Browder 1989). Un enfoque más razonable sería imitar los ciclos naturales, en lugar de luchar por imponer la simplicidad agrícola en sistemas inherentemente complejos. Ewel (1986) afirma que los ecosistemas sucesionales pueden ser modelos particularmente apropiados para el diseño de agroecosistemas tropicales. Partiendo de esta idea y de las contribuciones de la agroecología moderna, este artículo brinda algunos principios para el diseño de agroecosistemas, con énfasis en el desarrollo de sistemas de cultivo que fortalezcan la captura de nutrientes y la resistencia a plagas, con el fin de reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas y proveer estabilidad biológica y productividad.

Comparando entre ecosistemas naturales y ecosistemas agrícolas

Muchos agroecólogos argumentan que mediante el estudio de las diferencias estructurales y funcionales entre sistemas naturales y agroecosistemas, es posible aprender mucho acerca de los procesos subyacentes que tornan los cultivos más vulnerables a insectos plagas, más dependientes de insumos externos, y más ineficientes en el uso de recursos locales (Carrol *et al.* 1990).

Los componentes principales de un agroecosistema son las plantas (y animales) seleccionadas, propagadas, cuidadas y cosechadas por los seres humanos. En comparación con los sistemas sin intervenir, la composición y estructura de los agroecosistemas son relativamente simples. La biomasa de plantas está dominada por un cultivo principal ubicado en un área con límites bien definidos.

El resultado final es un sistema artificial de monocultivo que requiere de una intervención humana permanente. La preparación comercial de camas de semillas y la siembra mecánica reemplazan los métodos naturales de dispersión de semillas; los plaguicidas químicos reemplazan los controles naturales de poblaciones de malezas, insectos y patógenos; y la manipulación genética reemplaza los procesos naturales de evolución y selección. Hasta la descomposición se altera, porque la fertilidad del suelo se mantiene por medio de fertilizantes, y no a través del reciclaje de nutrientes (Cox y Atkins 1974).

La manipulación humana y la alteración de ecosistemas con el propósito de establecer una producción agrícola hace que los agroecosistemas sean estructural y funcionalmente muy diferentes de los ecosistemas naturales (Cuadro 1). Los agroecosistemas son ecosistemas artificiales impulsados por energía solar, al igual que los ecosistemas naturales, de los cuales difieren en que (i) las fuentes auxiliares de energía son los combustibles procesados (junto con el trabajo humano y animal), no las energías naturales; (ii) el manejo humano reduce considerablemente la diversidad, con el fin de maximizar el rendimiento de ciertos productos; (iii) las plantas y los animales principales están bajo una presión de selección artificial, no natural; y (iv) el control es externo y motivado por determinados objetivos, en lugar de un control interno mediante la retroalimentación del subsistema, como en los ecosistemas naturales (Gliessman 1998).

Los siguientes procesos, que alteran la estructura y función de los ecosistemas, son los más significativos en relación con la inestabilidad de los monocultivos tropicales:

Cuadro 1. Diferencias estructurales y funcionales entre los agroecosistemas y los ecosistemas naturales.

Características	Agroecosistema	Ecosistema natural
Productividad neta	Alta	Media
Cadenas tróficas	Simple, lineales	Compleja
Diversidad de especies	Baja	Alta
Diversidad genética	Baja	Alta
Ciclos minerales	Abiertos	Cerrados
Estabilidad (resistencia)	Baja	Alta
Entropía	Alta	Baja
Control humano	Definido	Innecesario
Permanencia temporal	Corta	Larga
Heterogeneidad del hábitat	Simple	Compleja
Fenología	Sincronizada	Estacional
Madurez	Inmadura, sucesión temprana	Madura, clímax

Fuente: modificado de Gliessman (1998).

Simplificación del campo y el paisaje

La agricultura reemplaza la flora y fauna original de grandes áreas, disminuyendo así la heterogeneidad del hábitat. Cuando persisten algunos parches de vegetación natural, se localizan en sitios inadecuados para la agricultura y su contribución a la estabilidad ecológica del área es mínima. A medida que se reduce la diversidad biológica, las estructuras tróficas tienden a simplificarse y muchos nichos quedan sin ocupar (Thies y Tschardtke 1999). El riesgo de mayores invasiones y brotes catastróficos de plagas y enfermedades es considerable, a pesar de la utilización intensiva de insumos en la forma de agroquímicos.

Los monocultivos son ambientes poco favorables para los enemigos naturales de las plagas, debido a los altos niveles de perturbación y a la falta de infraestructura ecológica. La capacidad de los depredadores y parasitoides para controlar los invasores es menor en sistemas simplificados que en agroecosistemas diversificados (Landis *et al.* 2000). Muchos agroecólogos argumentan que debido a la baja diversidad estructural en los agroecosistemas, estos tienen poca resistencia en relación con los ecosistemas naturales.

Interrupción de la sucesión

La agricultura impide la sucesión normal. Cada cultivo que se planta representa la primera etapa de una sucesión que no es persistente ni estable. El objetivo del cultivo es obtener la mayor cosecha posible. La interrupción constante mantiene el agroecosistema en las etapas tempranas de sucesión, donde se logra la mayor proporción de producción neta o biomasa cosechable. Para mantener un sistema de este tipo, los seres humanos deben asumir la responsabilidad de los costos de mantenimiento y regulación de los que normalmente se encargan los procesos naturales.

Plantas con menos defensas

En los ecosistemas naturales, el ensamblaje de organismos es el resultado de la selección natural y la coevolución. Los agroecosistemas consisten de un ensamblaje no natural de especies seleccionadas y domesticadas por los seres humanos, y de una serie de especies oportunistas, nativas o importadas, que logran invadir el sitio. Estos dos grupos no se han integrado en un sistema estable a través del proceso de coevolución, y es frecuente que muchas especies

oportunistas se conviertan en malezas, plagas insectiles y enfermedades que el productor debe combatir.

A lo largo del proceso de domesticación de los cultivos, los humanos han tendido a seleccionar plantas con menos defensas químicas y morfológicas. Esta selección intensiva, para obtener plantas con crecimiento rápido y gran productividad, resultó en plantas que asignan menos recursos a su defensa. Obviamente, muchos cultivos comestibles siguen conteniendo cantidades significativas de compuestos secundarios tóxicos, pero la tendencia general es a la reducción gradual de esos químicos y de las características morfológicas que antes protegían a las plantas de los artrópodos herbívoros. Esto suele tornarlas más vulnerables que sus parientes silvestres, lo cual explica la creencia común de que hay más brotes de insectos en los agroecosistemas que en los ecosistemas (Altieri 1994). Además, el uso excesivo de fertilizantes químicos puede crear desbalances en los nutrientes de los cultivos, lo cual reduce aún más la resistencia a plagas insectiles (Luna 1998).

Ciclaje ineficiente de los nutrientes

El reciclaje de nutrientes es mínimo en la mayoría de los agroecosistemas, donde el sistema pierde cantidades considerables de nutrientes en la cosecha o como resultado de la lixiviación o la erosión, causadas por la reducción en los niveles de biomasa del sistema. Los niveles menores de materia orgánica acumulada en el suelo y la actividad biológica reducida de los monocultivos son factores adicionales que explican la escasa fertilidad de los suelos en suelos tropicales desgastados y lixiviados. La frecuente exposición del suelo en los intervalos entre temporadas de cultivo también genera “fugas” de nutrientes. En lugar de utilizar nutrientes reciclados localmente, los productores dependen de nutrientes a base de petróleo para reemplazar las pérdidas (Magdoff y Van Ess 2000).

Construyendo a partir de la agricultura tradicional

Muchos científicos agrícolas afirman que el punto de partida de la elaboración de nuevas propuestas para el desarrollo agrícola, orientadas hacia los pobres, son los sistemas que los agricultores tradicionales han desarrollado o heredado a lo largo de los siglos. Dichos sistemas agrícolas complejos, adaptados a las

condiciones locales, han ayudado a los pequeños productores a manejar de manera sostenible los ambientes hostiles y satisfacer sus necesidades de subsistencia sin depender de la mecanización, los fertilizantes químicos, los plaguicidas u otras tecnologías de la ciencia agrícola moderna (Denevan 1995).

La permanencia de millones de hectáreas bajo esquemas de agricultura tradicional en forma de terrazas, policultivos y sistemas agroforestales, entre otros, documenta una estrategia agrícola exitosa y constituye un tributo a la creatividad de los pequeños productores del mundo en desarrollo (Wilken 1997). Estos microcosmos de agricultura tradicional ofrecen modelos promisorios para otras áreas, porque promueven la biodiversidad, prosperan sin agroquímicos y producen durante todo el año. Se estima que aproximadamente 50 millones de individuos, pertenecientes a unos 700 grupos indígenas, habitan y utilizan las regiones tropicales húmedas del planeta. Alrededor de dos millones de ellos viven en el Amazonas y el sur de México (Toledo 2000). En ese país, la mitad de los trópicos húmedos son utilizados por comunidades indígenas y ejidos con sistemas integrados de agricultura y silvicultura, con fines de subsistencia y comercio en mercados locales.

Los sistemas agrícolas tradicionales suelen presentar una gran diversidad de plantas en patrones agroforestales o de policultivo (Gliessman 1998). Esta estrategia de minimizar el riesgo plantando varias especies y variedades estabiliza los rendimientos en el largo plazo, promueve la diversidad alimentaria y maximiza el ingreso, aun con niveles tecnológicos bajos y recursos limitados (Harwood 1979).

La mayoría de los sistemas campesinos son productivos, a pesar de que utilizan pocos insumos químicos. En general, el trabajo agrícola presenta un alto rendimiento por unidad de insumo. La tasa de retorno energético del trabajo en una finca campesina típica es lo suficientemente alta como para asegurar la continuidad del sistema. Además, este tipo de sistema presenta tasas de retorno favorables entre insumos y producción en términos energéticos. Por ejemplo, en las laderas mexicanas el rendimiento del maíz cultivado en sistemas manuales de roza y quema es de aproximadamente 1940 kg ha⁻¹, con una proporción producción/insumos de 11:1. En Guatemala, sistemas similares producen cerca de 1066 kg ha⁻¹ de maíz, con una proporción de eficiencia energética de 4,84. Cuando se utiliza la tracción animal, los rendimientos no nece-

sariamente aumentan, pero la eficiencia energética disminuye a 3,11-4,34. Cuando se utilizan fertilizantes y otros agroquímicos, los rendimientos pueden aumentar hasta 5-7 Mg ha⁻¹, pero la razón energética comienza a mostrar valores de ineficiencia (menos de 2,0) (Netting 1993).

En la mayoría de los sistemas de policultivos desarrollados por pequeños productores, la productividad en términos de materiales cosechables por unidad de área es mayor que la de un monocultivo sometido al mismo nivel de manejo (Francis 1986). Las ventajas en el rendimiento varían del 20 al 60%; además, estas se acumulan gracias a que aparecen menos plagas y hay un uso más eficiente de los nutrientes, el agua y la radiación solar.

No hay duda de que el conjunto de prácticas de manejo agrícola utilizadas por muchos productores de escasos recursos constituye una buena fuente para quienes buscan crear agroecosistemas novedosos, adaptables a las circunstancias agroecológicas y socioeconómicas de los pobres rurales. Los campesinos utilizan una variedad de técnicas, de las cuales muchas se ajustan bien a las condiciones locales. Dichas técnicas tienden a hacer un uso intensivo de su conocimiento más que de los insumos externos, pero es claro que no todas son eficaces o aplicables, por lo que se harían necesarias las modificaciones y adaptaciones del caso. El desafío en dichas modificaciones es mantener los fundamentos para que estén basadas en la racionalidad y el conocimiento campesino.

Un ejemplo de lo anterior es el esfuerzo por desarrollar alternativas a la roza, tumba y quema. La roza, tumba y quema es quizás uno de los mejores ejemplos de una estrategia ecológica para manejar la agricultura en el Trópico. Al mantener un mosaico de parcelas cultivadas y otras en barbecho, los agricultores capturan la esencia de procesos naturales de regeneración del suelo típicos de la sucesión ecológica. Sin embargo, estos sistemas están alcanzando su límite, por una variedad de razones. El comprender la base lógica de la tala y quema, un descubrimiento contemporáneo —el uso de abonos verdes— ha brindado una vía ecológica para la intensificación de la milpa en áreas donde los barbechos altos ya no son posibles debido al crecimiento poblacional, la escasez de tierra o la conversión de bosque a pastura.

En América Central, la experiencia muestra que los sistemas de maíz basados en *Mucuna pruriens* son relativamente estables y ofrecen rendimientos acepta-

bles (2-4 Mg ha⁻¹) todos los años. En particular, este sistema parece disminuir significativamente el estrés causado por las sequías, ya que la capa de *mulch* ayuda a conservar la humedad del perfil del suelo. Como hay agua suficiente, hay una buena disponibilidad de nutrientes, sincronizada con las necesidades del cultivo. Además, *M. pruriens* reduce las malezas, ya sea porque evita físicamente su germinación y emergencia o durante el ciclo de *Mucuna*, o porque el enraizamiento poco profundo de las malezas en la interfase *mulch*-suelo facilita su control. Los datos muestran que este sistema, basado en el conocimiento local, que involucra la rotación anual continua de *M. pruriens* y maíz, puede mantenerse durante al menos 15 años con un nivel relativamente alto de productividad, sin deterioro aparente de la base de recursos naturales (Buckles *et al.* 1998).

Como ilustra el ejemplo anterior, se requiere un mayor conocimiento de la agroecología y etnología de los sistemas agrícolas tradicionales para desarrollar sistemas contemporáneos. Esto solo puede surgir de estudios integradores, que determinen la gran cantidad de factores que condicionan la forma en la cual los agricultores perciben su ambiente y, por consiguiente, cómo lo modifican, para luego traducir esa información a términos científicos modernos.

El diseño de agroecosistemas de sucesión análogos

Como lo han hecho los agricultores tradicionales, las comunidades sucesionales naturales pueden usarse

como modelos para el diseño de agroecosistemas, porque presentan varias características valiosas para la agricultura: (i) elevada resistencia a la invasión y el ataque de plagas; (ii) gran retención de nutrientes del suelo; (iii) agrobiodiversidad abundante; y (i) un nivel razonable de productividad (Ewel 1999).

Como afirma Gliessman (1998), el mayor reto en el Trópico consiste en diseñar agroecosistemas que, por un lado, aprovechen algunos de los atributos beneficiosos de las etapas tempranas de la sucesión y, por el otro, incorporen algunas de las ventajas de un sistema que alcanza etapas más tardías de la sucesión. Solo una de las características ecológicas deseables de los agroecosistemas —una productividad primaria neta elevada— ocurre en las etapas tempranas del desarrollo sucesional (Cuadro 2); todas las demás se manifiestan en etapas posteriores del desarrollo, razón importante para crear agroecosistemas más permanentes, incorporando cultivos perennes.

Principios ecológicos del diseño

1. *Aumentar la diversidad de especies*, ya que promueve un uso más completo de los recursos (nutrientes, radiación solar, agua, etc.), la protección contra plagas y el crecimiento compensatorio. Muchos investigadores han resaltado la importancia de varias combinaciones espaciales y temporales de plantas para facilitar el uso complementario de los recursos o brindar otras ventajas, como en el caso de las

Cuadro 2. Características ecológicas deseables de los ecosistemas en relación con el desarrollo sucesional.

Característica	Etapa sucesional			Beneficio para el ecosistema
	Temprana	Intermedia	Tardía	
Alta diversidad de especies		✓	✓	Menor riesgo de pérdida catastrófica de la cosecha
Alta biomasa total			✓	Una mayor fuente de materia orgánica en el suelo
Alta productividad primaria neta	✓			Mayor potencial para la producción de biomasa cosechable
Complejidad de las interacciones entre especies	✓	✓		Mayor potencial de control biológico
Ciclaje eficiente de nutrientes		✓	✓	Menor necesidad de insumos externos
Interferencia mutualista			✓	Mayor estabilidad; menor necesidad de insumos externos

Fuente: modificado de Gliessman (1998).

leguminosas que facilitan el crecimiento de cereales al suplirlos de una dosis extra de nitrógeno. El crecimiento compensatorio es otra característica importante, porque si una especie fracasa debido a las plagas o el clima, otra aprovechará los recursos disponibles. La combinación de cultivos minimiza el riesgo al crear la textura vegetativa que controla las plagas especialistas.

2. *Aumentar la longevidad* a través de la adición de plantas perennes con follaje abundante que brinde una cubierta permanente para proteger el suelo. La caída constante de las hojas permite la formación de materia orgánica y la circulación ininterrumpida de nutrientes. El establecimiento de plantas leñosas con sistemas radiculares densos y profundos constituye un mecanismo eficiente para la captura de nutrientes, que compensa las pérdidas por lixiviación.
3. *Establecer barbechos* para restituir la fertilidad del suelo a través de la acumulación de biomasa y la activación biológica, y para reducir las poblaciones de plagas agrícolas, interrumpiendo sus ciclos biológicos por la rotación de cultivos y barbechos.
4. *Incorporar más materia orgánica*, a través de la inclusión de leguminosas, plantas productoras de biomasa y la integración de animales. La acumulación de materia orgánica lábil y no lábil es crucial para activar la biología del suelo, mejorar su estructura y microporosidad, y aumentar sus nutrientes.
5. *Aumentar la diversidad del paisaje* estableciendo un mosaico de agroecosistemas, representativos de las distintas etapas sucesionales. El riesgo se diluye entre los distintos sistemas de cultivo. Se aprecia también un mejor control de plagas, ligado a la heterogeneidad espacial del paisaje.

Opciones de manejo para imitar la sucesión natural

En un esquema de sucesión manejada, se imitan las etapas sucesionales naturales introduciendo plantas, animales, prácticas e insumos agrícolas que promueven el desarrollo de interacciones y conexiones entre los componentes del agroecosistema. Se plantan especies (cultivos y otros) que capturan y retienen nutrientes en el sistema y promueven el buen desarrollo del suelo. Estas plantas incluyen leguminosas, con sus bacterias fijadoras de nitrógeno, y plantas con micorrizas que capturan fósforo. Conforme se desarrolla el sistema, incrementando su diversidad, la complejidad de

sus cadenas tróficas y la cantidad de interacciones mutualistas, se alcanzan mecanismos de retroalimentación más eficaces para el manejo de plagas y enfermedades. Durante el proceso, se enfatiza el establecimiento de un agroecosistema complejo e integrado, con una menor dependencia de insumos externos.

Hay muchas maneras en las cuales un productor puede permitir que el desarrollo sucesional continúe después de las primeras etapas a partir de un campo de tierra recientemente cultivada y con suelo desnudo. Un modelo general consiste en comenzar por un monocultivo anual y progresar hasta un sistema con árboles perennes, como sigue (Gliessman 1998):

—*Año 1-2*: el agricultor comienza por plantar un solo cultivo anual de crecimiento rápido, que capture nutrientes del suelo, se pueda cosechar temprano y actúe como especie pionera en el proceso de desarrollo.

—*Año 3*: el paso siguiente (también puede ser el primero) consiste en plantar un policultivo de anuales representativo de los diferentes componentes de la etapa pionera. Las especies deben diferir en sus necesidades nutricionales, los insectos que atraen, la profundidad de sus raíces, y la proporción de biomasa que devuelven al suelo. Una de ellas podría ser una leguminosa fijadora de nitrógeno. Todas estas especies pioneras contribuirán al inicio del proceso de recuperación y podrían modificar el ambiente para que otras plantas y animales —especialmente los macro y microorganismos necesarios para desarrollar el ecosistema del suelo— puedan empezar la colonización.

—*Año 4*: tras la etapa de desarrollo inicial, pueden introducirse cultivos perennes de ciclo corto. Estos aprovecharán la cubierta del suelo creada por los cultivos pioneros y diversificarán el agroecosistema. Los sistemas radiculares más profundos, la mayor cantidad de materia orgánica almacenada en la biomasa en pie y la diversidad de hábitats y microclimas se combinan para que el desarrollo sucesional del agroecosistema progrese.

—*Año 5*: una vez mejoradas las condiciones del suelo, se le prepara para sembrar perennes de ciclo más largo, especialmente frutales o árboles, intercalados con anuales y perennes de ciclo corto. Mientras los árboles están en una etapa temprana del crecimiento, ejercen un efecto limitado sobre el ambiente que los rodea, a la vez que se benefician de los cultivos

anuales cercanos, porque las etapas tempranas de crecimiento suelen ser más susceptibles a la interferencia de malezas agresivas.

—*Año 6*: conforme crecen los árboles, se puede seguir cultivando anuales y perennes de ciclo corto entre ellos.

—*Año 7 en adelante*: una vez finalizado el desarrollo de los árboles, se alcanza el punto final del proceso. Esta última etapa está dominada por plantas leñosas, fundamentales para las capacidades regenerativas de los barbechos debido a sus sistemas radiculares profundos y permanentes.

Cuando se ha establecido el agroecosistema, la pregunta es cómo manejarlo. El agricultor dispone de tres opciones básicas:

- Retornar el sistema entero a las etapas tempranas de la sucesión introduciendo una perturbación considerable, como talar los árboles del sistema perenne. Muchas de las ventajas ecológicas obtenidas se perderán y el proceso deberá recomenzar desde el principio.
- Mantener el sistema como un agroecosistema de perennes o árboles.
- Reintroducir una perturbación al ecosistema de manera localizada y controlada, aprovechando las ventajas de la dinámica del sistema. Pueden limpiarse algunas áreas pequeñas, devolviéndolas a una etapa sucesional más temprana y permitiendo el cultivo de perennes y plantas de ciclo corto. Si la perturbación se hace con cuidado, el ecosistema del subsuelo se puede mantener en una etapa sucesional más tardía, mientras la superficie se dedica a especies altamente productivas que se pueden cosechar.

Un ejemplo de diseño sucesional de cultivos se encuentra en Costa Rica, donde se hicieron reemplazos temporales y espaciales de especies silvestres por cultivares con una botánica, estructura y ecología similar. Los miembros sucesionales del sistema natural, como *Heliconia* spp., curcubitáceas, *Ipomea* sp., leguminosas, arbustos, pastos y árboles pequeños fueron reemplazados por plátanos (*Musa* sp.), variedades de zapallo (*Curcubita*) y camote (*Dioscorea*). Entre el segundo y tercer año, los árboles de crecimiento rápido (*Bertholletia excelsa*, *Prunus persica*, *Palmae* y *Dalbergia nigra*) formaron un

estrato adicional, manteniendo así una cubierta permanente y evitando la degradación y la lixiviación, con una provisión de nutrientes a lo largo de todo el año (Ewel 1999).

Estrategias de diversificación

En el proceso de emulación de la diversidad natural, hay varias estrategias posibles para restaurar la diversidad espacial y temporal del agroecosistema (Finch y Sharp 1976, Nair 1982, Francis 1986, Pearson e Ison 1987, Altieri 1994, Gliessman 1998):

1. *Rotación de cultivos*: la diversidad temporal, en forma de abonos verdes de leguminosas, se incorpora a los cultivos para proveer nutrientes y romper el ciclo de varios insectos plaga, enfermedades y malezas.
2. *Mezcla de variedades*: aumentar la diversidad genética en el campo mediante la introducción de mezclas de variedades y/o multilíneas incrementa la heterogeneidad genética, reduciendo la vulnerabilidad a enfermedades propia de los monocultivos.
3. *Policultivos*: los sistemas complejos, donde dos o más especies se siembran con la cercanía suficiente para que haya competencia o complementariedad, permiten que se incrementen los rendimientos y minimicen los riesgos.
4. *Sistemas agroforestales*: sistemas en los cuales los árboles se cultivan junto con cultivos anuales y/o animales; esto ofrece los beneficios de los cultivos perennes y fortalece las relaciones de complementariedad entre los componentes, mientras promueve un uso múltiple de los agroecosistemas.
5. *Cultivos de cobertura*: los rodales puros o mixtos de leguminosas u otras especies de plantas anuales bajo huertas de frutales permiten obtener una cobertura al suelo y mejorar su fertilidad, aumentar el control biológico de plagas y modificar el microclima del huerto.
6. *Incorporación de animales mediante la mezcla de cultivos y ganado*: fomenta una alta producción de biomasa y un reciclaje óptimo.

Todas las estrategias de diversificación mencionadas anteriormente comparten las siguientes características (Altieri 1995):

- a. Mantienen una cobertura vegetal abundante como medida eficaz para conservar suelo y agua, lo cual

se logra mediante las prácticas de labranza mínima, produciendo *mulch* y utilizando cultivos de cobertura y otros métodos apropiados.

- b. Proveen una oferta regular de materia orgánica al suelo mediante la adición de biomasa de plantas, estiércol, o compost, que fungen como fuente de nutrientes y energía para las poblaciones microbianas.
- c. Mejoran los mecanismos de reciclaje de nutrientes, utilizando sistemas basados en leguminosas, árboles y la incorporación de animales.
- d. Promueven la regulación de plagas, gracias a la mayor actividad de los agentes de control biológico que se obtiene al conservar los enemigos naturales y antagonistas de las plagas, mediante el establecimiento de una infraestructura ecológica asociada a los cultivos diversificados.

Los mecanismos que resultan en ecosistemas diversos más productivos están insertos en el proceso de facilitación. La facilitación ocurre cuando un cultivo modifica el ambiente de forma que beneficia un segundo cultivo; por ejemplo, cuando un cultivo baja la población de algún herbívoro, o libera nutrientes que pueden ser aprovechados por el segundo cultivo (Vandermeer 1989). La facilitación puede resultar en rendimientos abundantes aun cuando la competencia entre especies es significativa. Los efectos combinados o las sinergías de los ecosistemas complejos se comprenden mejor cuando examinamos los hallazgos sobre los efectos de la diversidad de plantas y la fertilidad del suelo sobre las poblaciones de insectos plagas.

Diversidad vegetal y brotes de plagas

Los experimentos que ponen a prueba la teoría de que una menor diversidad de plantas en los agroecosistemas conduce a una mayor abundancia de insectos herbívoros han demostrado que la combinación de una determinada especie de planta con el hospedante primario de un herbívoro especializado arroja un resultado relativamente consistente: los insectos plaga especialistas son más abundantes en los monocultivos que en los sistemas diversificados (Altieri y Letourneau 1982, Andow 1991).

Existen varios trabajos publicados acerca de los efectos de la diversidad de insectos dentro del hábitat (Altieri 1994). Se han propuesto dos hipótesis ecológi-

cas (la hipótesis del enemigo natural y la hipótesis de la concentración de recursos) para explicar por qué se pueden estabilizar las poblaciones de insectos en los agroecosistemas mediante la construcción de arquitecturas vegetales que promueven los enemigos naturales o inhiben directamente los ataques de plagas. En la literatura abundan los ejemplos de experimentos que documentan que la diversificación de sistemas de cultivos suele conducir a una reducción en las poblaciones de insectos. Andow (1991) examinó 150 artículos publicados que documentan el efecto de la diversificación de agroecosistemas sobre la abundancia de insectos examinando 198 especies en total. Cincuenta y tres por ciento de dichas especies fueron menos abundantes en el sistema más diversificado, 18% en el sistema diversificado, 9% no mostraron diferencia y 20% reportaron una respuesta variable.

Muchos de estos estudios han trascendido la fase de investigación, encontrando aplicaciones para el control de plagas específicas, como el lepidóptero barrenador del tallo (*Chilo partellus*) en África. Científicos investigadores del ICIPE (siglas en inglés del Centro Internacional de Fisiología y Ecología de Insectos) desarrollaron un sistema de manejo de hábitats que utiliza dos tipos de cultivos junto al maíz: uno que repele los barrenadores y otro que atrae sus enemigos naturales (Khan *et al.* 1998). Este sistema de rechazo y atracción se probó en 450 fincas en dos distritos de Kenya, y hoy en día se utiliza en los sistemas nacionales de extensión en África del Este. Los productores que lo adoptaron en Trans Nzoia reportan un aumento del 15 al 20% en el rendimiento del maíz. En el distrito semiárido de Suba —plagado por barrenadores y por la maleza parasítica *Striga* (Scrophulariaceae)—, se obtuvo un incremento sustancial en el rendimiento de leche en los últimos dos años, y los productores pueden mantener vacas lecheras con el forraje que producen. Cuando los productores siembran *Z. mays*, el pasto *Pennisetum purpureum* y *Leguminosae* juntos, obtienen 2,30 dólares por cada dólar invertido, comparados con 1,50 dólares obtenidos del maíz en monocultivo. Dos de los cultivos trampa más útiles para atraer los enemigos naturales del barrenador son los pastos *P. purpureum* y *Sorghum vulgare sudanese*, ambos importantes para forraje, que se plantan alrededor del maíz. Dos cultivos excelentes para repeler el barrenador, que se plantan entre las hileras de maíz, son el pasto *Melinis minutiflora*, que también repele las garrapatas, y la

leguminosa *Desmodium*, capaz de suprimir la maleza *Striga*, fijar nitrógeno y ser un forraje excelente. Como ventaja adicional, la venta de semilla de *Desmodium* está resultando ser una buena oportunidad para que las mujeres de la zona generen ingresos.

Es claro que tanto los datos empíricos como los argumentos teóricos sugieren que las diferencias en la abundancia de plagas entre sistemas simples y diversos puede explicarse por diferencias en el movimiento, colonización y comportamiento reproductivo de los herbívoros y por las actividades de los enemigos naturales. Las investigaciones sugieren, además, que cuanto más diversos sean los agroecosistemas y cuanto más tiempo esta diversidad permanezca ininterrumpida, más vínculos internos se desarrollan y habrá una mayor estabilidad (Altieri y Nicholls 1999). Este tipo de investigación es crucial para la gran mayoría de agricultores que dependen de complejos de depredadores y parásitos asociados a los sistemas mixtos de cultivo para controlar las plagas. Cualquier cambio en los niveles de diversidad de plantas dentro de esos sistemas puede conducir a cambios que originen una mayor dependencia de los pesticidas. Hacen falta más estudios para determinar los elementos que subyacen las combinaciones de plantas que repelen la invasión de plagas y favorecen los enemigos naturales.

Suelos sanos, plantas sanas

Para los agricultores de escasos recursos, las estrategias de diversificación de cultivos deben complementarse con aplicaciones regulares de enmiendas orgánicas (residuos de cultivos, estiércol y compost) para mantener o mejorar la calidad y productividad del suelo. Aunque se trata de una práctica común de los pequeños agricultores tropicales, se sabe poco acerca de los efectos multifuncionales de las enmiendas orgánicas sobre otros componentes del agroecosistema, más allá de los efectos documentados del mejoramiento de la estructura y contenido de nutrientes de el suelo. Los abonos orgánicos y los compost bien preparados pueden ser fuente de sustancias que estimulan el crecimiento, tales como el ácido indol-3-acético y los ácidos fúlvicos y húmicos (Magdoff y Van Es 2000). Los efectos beneficiosos del ácido húmico en el crecimiento de las plantas son mediados por una serie de mecanismos, muchos de ellos similares a los que resultan de la aplicación directa de reguladores del crecimiento.

La capacidad de un cultivo para resistir o tolerar plagas está ligada a las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. La humedad adecuada, buena textura del suelo, pH moderado, cantidades apropiadas de materia orgánica y nutrientes, y una comunidad diversa y activa de organismos del suelo contribuyen a la salud de las plantas. Los suelos ricos en materia orgánica suelen presentar una buena fertilidad, así como cadenas tróficas complejas y organismos benéficos que previenen la infección por organismos causantes de enfermedades, como *Pythium* y *Rhizoctonia*. Por otro lado, algunas prácticas agrícolas, como las aplicaciones frecuentes de nitrógeno fertilizante, pueden crear desbalances nutricionales y volver los cultivos más susceptibles a enfermedades causadas por *Pythium* y *Rhizoctonia*, además de estimular los brotes de homópteros, como los áfidos y cicadélidos (Campbell 1989). De hecho, cada vez hay más evidencias de que los cultivos que crecen en suelos orgánicamente ricos y biológicamente activos son menos susceptibles a los ataques de plagas. Muchos estudios sugieren que la susceptibilidad fisiológica de los cultivos a los insectos plaga y patógenos puede verse afectada por el tipo de fertilizante utilizado (orgánico frente a químico).

En la literatura abundan ejemplos de los beneficios de las enmiendas orgánicas que promueven los antagonistas y aumentan el control biológico de las enfermedades. Varias bacterias de los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*, así como el hongo *Trichoderma*, son antagonistas que suprimen patógenos a través de la competencia, lisis, antibiosis e hiperparasitismo (Palti 1981).

Los estudios que reportan la menor abundancia de insectos herbívoros en sistemas de bajos insumos adscriben dicha reducción en parte al bajo contenido de N en los sistemas orgánicos (Luna 1988). En Japón, la densidad del saltahoja *Sogatella furcifera* fue significativamente menor, mientras que las tasas de colonización de hembras adultas y de supervivencia de los estados inmaduros fue menor en el arroz orgánico. Consecuentemente, la densidad de ninfas y adultos en las generaciones siguientes disminuyó en los campos orgánicos (Kajimura 1995). En Inglaterra, los campos convencionales de trigo (*Triticum aestivum*) presentaron una mayor infestación del áfido *Metopolophium dirhodum* que sus contrapartes orgánicas. Este cultivo mostró también mayores niveles de aminoácidos libres en sus hojas en el mes

de junio, que se cree resultaron de una aplicación de nitrógeno en abril. Sin embargo, la diferencia en las poblaciones de áfidos en ambos cultivos se atribuyó a la respuesta del áfido a las proporciones relativas entre ciertos aminoácidos no proteicos y aminoácidos proteicos presentes en las hojas en el momento de la llegada de los áfidos (Kowalski y Visser 1979). En los experimentos de invernadero, las hembras del barrenador del maíz *Ostrinia nubilalis* ovipositaron una cantidad significativamente mayor de huevos en plantas fertilizadas con químicos que con fertilizantes orgánicos (Pelan *et al.* 1995).

Estos hallazgos tienen una importancia fundamental para los agricultores de escasos recursos en las zonas tropicales, como los de Cakchiquel y Patzum (Guatemala), que han sufrido mayores infestaciones de plagas (áfidos y *Helicoverpa* spp.) desde que abandonaron la fertilización orgánica y adoptaron fertilizantes sintéticos (Morales *et al.* 2001). Muchos agricultores que se están modernizando podrían enfrentar problemas similares debido al mayor uso de fertilizantes, que puede ocasionar desbalances en la agroecología de sistemas agrícolas específicos.

Conclusiones

La innovación tecnológica en los Trópicos se ha caracterizado por la transferencia de sistemas agrícolas de las regiones templadas, sin la consideración debida a su pertinencia ecológica. El monocultivo (cultivos extensivos y grandes plantaciones) es básicamente una herencia de los tiempos coloniales, que sigue teniendo provecho económico en el corto plazo, pero que en el largo constituye una insensatez ecológica. Llegó el momento de utilizar los principios ecológicos como parte de los criterios para el diseño de agroecosistemas, reemplazando lo que se ha convertido en un proceso de toma de decisiones estrictamente económico por uno que tome en cuenta nociones ecológicas y, especialmente, las perspectivas de los agricultores locales (Vandermeer 1995).

Un desafío considerable consiste en aplicar estas nociones al diseño de agroecosistemas nuevos, utilizando la naturaleza como modelo. Estas imitaciones, al igual que el modelo natural, pueden ser productivas, resistentes a las plagas y conservadoras de nutrientes y otros recursos y, consecuentemente, más eficientes y menos riesgosas para los agricultores, especialmente los campesinos más pobres. Como se ha

discutido, una estrategia clave para una agricultura tropical sostenible consiste en reincorporar la diversidad al paisaje agrícola y manejarlo lo más eficazmente posible. Las propiedades ecológicas emergentes se desarrollan en agroecosistemas diversificados que permiten al sistema funcionar de manera que se mantenga la fertilidad del suelo, se promueva la regulación de plagas y permita una productividad sostenible.

Las relaciones entre la diversidad de especies y la estabilidad ecosistémica no son simples. Aparentemente, las características funcionales de las especies componentes son tan importantes como el número de especies. Estudios recientes con pasturas concluyen que los papeles funcionalmente diferentes desempeñados por muchas plantas son tan relevantes como el número total de especies al determinar los procesos y servicios de los ecosistemas (Tilman *et al.* 1996). Es mucho más sencillo imitar procesos específicos del ecosistema que tratar de duplicar la naturaleza en toda su complejidad. Todo lo que se necesita es seleccionar el tipo de diversidad adecuado (agregando una o dos especies de plantas) para alcanzar una resistencia a herbívoros, y una mayor productividad y disponibilidad de nutrientes.

La mayor limitante para promover el uso de agroecosistemas ricos en especies es que estos son difíciles de manejar. El mayor desafío al manejar un sistema sucesional consiste en aprender a introducir perturbaciones de forma que estimulen la productividad del sistema por un lado, y provean resistencia al cambio y la variación por el otro. Esto se puede lograr de varias maneras, dependiendo de las condiciones ambientales locales, la estructura de los ecosistemas naturales maduros normalmente presentes, y la posibilidad de mantener las modificaciones en el largo plazo.

Algunos autores argumentan que hay una relación proporcional entre alta diversidad y poco rendimiento, y que los agricultores siempre deberán escoger entre sistemas con poco riesgo y poca productividad y sistemas de alto riesgo y alta productividad. Según Ewel (1986), los mismos atributos que hacen que los agroecosistemas diversos sean atractivos parecen tener costos biológicos incompatibles con el alto rendimiento.

La literatura está algo dividida en este aspecto, aunque un número considerable de autores señala las ventajas de alto rendimiento de los policultivos y la multifuncionalidad de las fincas pequeñas y diversificadas (Francis 1986, Vandermeer 1989). La misma

práctica de millones de pequeños agricultores tropicales que favorecen los policultivos, la agroforestería y la diversificación le otorga credibilidad a un enfoque más agroecológico. No obstante, la tarea para los agroecólogos del Trópico será diseñar agroecosistemas complejos que puedan sostener productos cosechables y funciones ecológicas.

Dado el rango de circunstancias económicas y ecológicas, es posible que, para agricultores con capital y acceso a insumos, una rotación simple o un intercultivo sea suficiente para solucionar sus problemas puntuales. Para agricultores pobres, donde el fracaso de una cosecha sería intolerable, los agroecosistemas diversificados son la mejor opción. Cualquiera que sea el sistema preferido, la diversidad será valiosa en agroecosistemas de gran escala y para pequeños agricultores, por una serie de razones (Altieri 1994, Gliessman 1998):

- Conforme aumenta la diversidad, aumentan también las oportunidades para la coexistencia y las interacciones benéficas entre especies que pueden incrementar la sostenibilidad del agroecosistema.
- Una mayor diversidad suele permitir una mayor eficiencia en el uso de los recursos del agroecosistema. Hay una mejor adaptación en el nivel de sistema a la heterogeneidad del hábitat, lo cual conduce a una complementariedad de las necesidades de las especies, diversificación de nichos, traslape de especies nicho y asignación de recursos.
- Los ecosistemas donde las plantas están mezcladas poseen una resistencia asociada a los herbívoros. Al igual que en los sistemas diversificados, hay una mayor abundancia y diversidad de enemigos naturales de los insectos plaga, manteniendo las poblaciones de especies individuales de herbívoros bajo control.
- El ensamblaje diversificado de los cultivos puede crear diferentes microclimas entre los sistemas de cultivo, que pueden ser ocupados por una serie de organismos tales como depredadores, parasitoides, polinizadores, fauna del suelo y antagonistas, de gran importancia en el sistema agrícola.
- La diversidad del paisaje agrícola puede contribuir a la conservación de la biodiversidad alrededor de los ecosistemas naturales.
- La diversidad en el suelo puede tener un efecto importante sobre una gran variedad de servicios

ecológicos, tales como el reciclaje de nutrientes, la detoxificación de sustancias químicas nocivas y regulación del crecimiento de las plantas.

- La diversidad de cultivos puede reducir el riesgo de los agricultores, especialmente aquellos en áreas marginales con condiciones ambientales impredecibles. Si un cultivo falla, el rendimiento y la ganancia de los otros compensará la pérdida.

Literatura citada

- Adams, MW; Ellingbae, AH; Rossineau, EC. 1971. Biological uniformity and disease epidemics. *BioScience* 21:1067-1070.
- Altieri, MA; Letourneau, DK. 1982. Vegetation management and biological control in agroecosystems. *Crop Protection* 1:405-430.
- _____. 1991. Ecology of tropical herbivores in polycultural agroecosystems. *In* Price, PW; Lewinshon, TM; Benson, WW. eds. *Plant-animal interactions: evolutionary ecology in tropical and temperate regions*. New York, NY, US, John Wiley and Sons. p. 607-616.
- _____. 1995. *Agroecology: the science of sustainable agriculture*. Boulder, CO, US, Westview Press.
- _____. 1994. *Biodiversity and pest management in agroecosystems*. New York, NY, US, Haworth Press.
- _____. 1999. Applying agroecology to enhance the productivity of peasant farming systems in Latin America. *Environment, Development and Sustainability* 1:197-217.
- _____; Nicholls, CI. 1999. Biodiversity, ecosystem function and insect pest management in agricultural systems. *In* Collins, WW; Qualset, CO. eds. *Biodiversity in Agroecosystems*. Boca Raton, FL, US, CRC Press.
- _____; Letourneau, DK; Davis, JR. 1983. Developing sustainable agroecosystems. *BioScience* 33:45-49.
- Andow, DA. 1991. Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual Review of Entomology* 36:561-586.
- Barbosa, P. 1998. *Conservation biological control*, San Diego, CA, US, Academic Press.
- Beets, WC. 1990. *Raising and sustaining productivity of smallholder farming systems in the Tropics*, Alkmaar, NL, AgBé Publishing.
- Browder, JO. 1989. *Fragile lands in Latin America: strategies for sustainable development*. Boulder, CO, US, Westview Press.
- Buckles, D; Triomphe, B; Sain, G. 1998. *Cover crops in hillside agriculture: farmer innovation with Mucuna*. Ottawa, CA, International Development Research Center.
- Campbell, R. 1989. *Biological control of microbial plant pathogens*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Carrol, CR; Vandermeer, JH; Rosset, PM. 1990. *Agroecology*. New York, NY, US, McGraw Hill.
- Conway, GR. 1997. *The doubly green revolution*. London, UK, Penguin Books.
- Cox, GW; Atkins, ND. 1974. *Agricultural ecology: an analysis of world food production systems*. San Francisco, CA, US, W.H. Freeman and Company.

- De Grandi, JC. 1996. El desarrollo de los sistemas de agricultura campesina en America Latina. Roma, IT, FAO. p. 83. (Serie Gestion de Sistemas de Explotacion Agricola no. 12).
- Denevan, WM. 1995. Prehistoric agricultural methods as models for sustainability. *Advances in Plant Pathology* 11:21-43.
- Ewel, JJ. 1986. Designing agricultural ecosystems for the humid tropics. *Annual Review of Ecological Systems* 17:245-71.
- _____. 1999. Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agroforestry Systems* 45:1-21.
- Finch, CV; Sharp, CW. 1976. *Cover Crops in California Orchards and Vineyards*. Washington, DC, US, USDA Soil Conservation Service.
- Francis, CA. 1986. *Multiple cropping systems*. New York, NY, US, MacMillan Press.
- Gliessman, SR. 1998. *Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture*. Ann Arbor, MI, US, Ann Arbor Press.
- Harwood, RR. 1979. *Small Farm Development – understanding and improving farm systems in the humid tropics*. Boulder, CO, US, Westview Press.
- Hendrix, PH; Crossley Junior, DA; Coleman, DC. 1990. Soil biota as components of sustainable agroecosystems. *In* Edwards, CA; Lal, R; Madden, P; Miller, R; House, G. eds. *Sustainable Agricultural Systems*. Ankeny, IA, US, Soil and Water Conservation Society.
- Kajimura, T. 1995. Effect of organic rice farming on planthoppers. *Population Ecology (Japan)* 37:219-224.
- Khan, ZR; Ampong-Nyarko, K; Hassanali, A; Kimani, S. 1998. Intercropping increases parasitism of pests. *Nature* 388:631-632.
- Kowalski, R; Visser, PE. 1979. Nitrogen in a crop-pest interaction: cereal aphids. *In* Lee, JA. ed. *Nitrogen as an ecological parameter*. Oxford, UK, Blackwell Scientific Publications. p. 67-74.
- Landis, DA; Wratten, SD; Gurr, GA. 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology* 45:175-201.
- Liebman, M; Ohno, T. 1998. Crop rotation and legume residue effects on weed emergence and growth: implications for weed management. *In* Hatfield, JL; Stwert, BA. eds. *Integrated weed and soil management*. Ann Arbor, MI, US, Ann Arbor Press. p. 181-221.
- Luna, J. 1998. Influence of soil fertility practices on agricultural practices on agricultural pests. *Scientific Conference (4)*. Proceedings. *Global perspectives in agroecology and sustainable agricultural systems*. Eds. P Allen; DVan Dusen. Santa Cruz, CA, US, International Organic Agriculture Movements (IFOAM). p. 589-600.
- Magdoff, F; Van Es, H. 2000. *Building soils for better crops*. Beltsville, MD, US, Sustainable Agriculture Networks. p. 230.
- Morales, H; Perfecto, I; Ferguson, B. 2001. Traditional soil fertilization and its impact on insect populations in corn. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 84:145-155.
- Nair, PKR. 1982. *Soil Productivity Aspects of Agroforestry*. Nairobi, KE, ICRAF.
- Netting, R. 1993. *Smallholders, householders : farm families and the ecology of intensive, sustainable agriculture*. Stanford, CA, US, Stanford University Press.
- Norman, MJT. 1979. *Annual cropping systems in the tropics*. Gainesville, FL, US, University Presses of Florida.
- Ortega, E. 1986. *Peasant agriculture in Latin America*. Santiago, CL, Joint ECLAC-FAO Agriculture Division.
- Palti, J. 1981. *Cultural practices and infectious plant diseases*. New York, NY, US, Springer.
- Pearson, CJ; Ison, RL. 1987. *Agronomy of grassland systems*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Phelan, PL; Maan, JF; Stinner, BR. 1995. Soil fertility management and host preference by European corn borer on maize: a comparison of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 56:1-8.
- Pretty, JN. 1994. *Regenerating Agriculture*. London, UK, Earthscan Publications Ltd.
- Reijntjes, C; Haverkort, B; Waters-Bayer, A. 1992. *Farming for the future: an introduction to low-external-input and sustainable agriculture*. London, UK, MacMillan Press Ltd.
- Richards, P. 1985. *Indigenous agricultural revolution*. Boulder, CO, US, Westview Press.
- Robinson, RA. 1996. *Return to resistance: breeding crops to reduce pesticide resistance*. Davis, CA, US, AgAccess.
- Soule, JD; Piper, JK. 1992. *Farming in nature: a image*. Washington, DC, US, Island Press.
- Sumner, DR. 1982. *Crop rotation and plant productivity*. *In* Rechcigl, M. ed. *Handbook of Agricultural Productivity*. Boca Raton, FL, US, CRC Press. v 1.
- Thies, C; Tschardtke, T. 1999. Landscape structure, and biological control in agroecosystems. *Science* 285: 893-895.
- Tilman, D; Wedin, D; Knops, J. 1996. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature* 379:718-720.
- Toledo, VM. 2000. *La Paz en Chiapas: ecología, luchas indígenas y modernidad alternativa*. Distrito Federal, MX, Ediciones Quinto Sol.
- Vandermeer, J. 1989. *The ecology of intercropping*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- _____. 1995. The ecological basis of alternative agriculture. *Annual Review of Ecological Systems* 26:201-224.
- Wilken, GC. 1987. *Good farmers: traditional agricultural resource management in Mexico and Guatemala*. Berkeley, CA, US, University of California Press.