

Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación

M.A. Altieri, C.I. Nicholls

Universidad de California, Berkeley

Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. La conversión de sistemas convencionales de producción, caracterizados por monocultivos manejados con altos insumos a sistemas diversificados de bajos insumos, se basa en dos pilares agroecológicos: la diversificación del hábitat y el manejo orgánico del suelo. El funcionamiento óptimo del agroecosistema depende de diseños espaciales y temporales que promueven sinergias entre los componentes de la biodiversidad arriba y abajo del suelo, las cuales condicionan procesos ecológicos claves como la regulación biótica, el reciclaje de nutrientes y la productividad. La evolución de la transición agroecológica puede ser monitoreada por un conjunto de indicadores de sustentabilidad que estiman la calidad del suelo y la salud del cultivo.

Palabras claves: agroecología, conversión, biodiversidad, indicadores de sustentabilidad

Agroecological conversion of conventional production systems: theory, strategies and assessment. The conversion of high input conventional monocultures to diversified, low external input agroecosystems is based on two agroecological pillars: habitat diversification and organic soil management. The optimal function of agroecosystems depends on the spatial-temporal designs that promote synergies between above and below ground key biodiversity components, which in turn determine the expression of ecological processes such as pest regulation, nutrient cycling and productivity. The evolution of this agroecological transition can be monitored using sustainability indicators which assess soil quality and plant health.

Key words: agroecology, conversion, biodiversity, sustainability indicators

Introducción

La agroecología se perfila hoy como la ciencia fundamental para orientar la conversión de sistemas convencionales de producción (monocultivos dependientes de insumos agroquímicos) a sistemas más diversificados y autosuficientes. Para esto la agroecología utiliza principios ecológicos que favorecen procesos naturales e interacciones biológicas que optimizan sinergias de modo tal que la agrobiodiversidad sea capaz de subsidiar por sí misma procesos claves tales como la acumulación de materia orgánica, fertilidad del suelo, mecanismos de regulación biótica de plagas y la productividad de los cultivos (Gliessman, 1998). Estos procesos son cruciales pues condicionan la sustentabilidad de los agroecosistemas. La mayoría de estos procesos se optimizan mediante interacciones que emergen de combinaciones específicas espaciales y temporales de cultivos, animales y árboles, complementados por manejos orgánicos del suelo.

Las estrategias de diversificación agroecológica tienden a incrementar la biodiversidad funcional de los agroecosistemas: una colección de organismos que juegan papeles ecológicos claves en el agroecosistema. Las tecnologías promovidas son multifuncionales en tanto su adopción implica, por lo general, cambios favorables simultáneos en varios componentes y procesos agroecológicos. Por ejemplo, los cultivos de cobertura funcionan como un sistema multifuncional al actuar simultáneamente sobre procesos y componentes claves de los huertos frutales y viñedos: incrementan la entomofauna benéfica, activan la biología del suelo, mejoran el nivel de materia orgánica y con eso la fertilidad y la capacidad de retención de humedad del suelo, más allá de reducir la susceptibilidad a la erosión (Altieri, 1995).

El proceso de conversión de sistemas convencionales caracterizados por monocultivos con alta dependencia de insumos externos a sistemas diversificados de baja intensidad de manejo es de carácter transicional y se compone de tres fases (Gliessman, 1998):

1. Eliminación progresiva de insumos agroquímicos mediante la racionalización y mejoramiento de la eficiencia de los insumos externos a través de estrategias de manejo integrado de plagas, malezas, suelos, etc.
2. Sustitución de insumos sintéticos por otros alternativos u orgánicos.
3. Rediseño de los agroecosistemas con una infraestructura diversificada y funcional que subsidia el funcionamiento del sistema sin necesidad de insumos externos sintéticos u orgánicos.

A lo largo de las tres fases se guía el manejo con el objetivo de asegurar los siguientes procesos (Altieri, 1991):

- aumento de la biodiversidad tanto sobre como debajo del suelo.
- aumento de la producción de biomasa y el contenido de materia orgánica del suelo.
- disminución de los niveles de residuos de pesticidas y la pérdida de nutrientes y agua.
- establecimiento de relaciones funcionales y complementarias entre los diversos componentes del agroecosistema.
- optima planificación de secuencias y combinaciones de cultivos y animales, con el consiguiente aprovechamiento eficiente de recursos locales.

La mayoría de las prácticas que promueven los entusiastas de la agricultura sustentable caen en las fases 2 y 3. Aunque estas dos fases ofrecen ventajas desde el punto de vista económico al reducir el uso de insumos agroquímicos externos y porque tienen un menor impacto ambiental, estos manejos dejan intacta la estructura del monocultivo y no conducen a que los agricultores realicen un rediseño productivo de sus sistemas (Power, 1999). En realidad, ambas fases contribuyen poco para que los agricultores evolucionen hacia sistemas alternativos autorregulados. En la mayoría de los casos el MIP se traduce en “manejo inteligente de pesticidas”, ya que consiste en un uso mas selectivo de pesticidas de acuerdo a umbrales económicos pre-establecidos, pero que las plagas usualmente superan bajo condiciones de monocultivo.

Por otra parte la sustitución de insumos, sigue el mismo paradigma de la agricultura convencional en la que el objetivo es superar el factor limitante, aunque esta vez se realiza con insumos alternativos y no agroquímicos. Este tipo de manejo ignora el hecho de que el factor limitante (una plaga, una deficiencia nutricional, etc.) no es más que un síntoma de que un proceso ecológico no funciona correctamente, y que la adición de lo que falta, hace poco por optimizar el proceso irregular. Es claro que la sustitución de insumos ha perdido su potencial agroecológico, pues no va a la raíz del problema sino al síntoma.

El rediseño predial, por el contrario, intenta transformar la estructura y función del agroecosistema al promover diseños diversificados que optimizan los procesos claves. La promoción de la biodiversidad en agroecosistemas es la estrategia clave en el re-diseño predial, ya que la investigación ha demostrado que (Power, 1999):

- Una mayor diversidad en el sistema agrícola conlleva a una mayor diversidad de biota asociada.
- La biodiversidad asegura una mejor polinización y una mayor regulación de plagas, enfermedades y malezas.
- La biodiversidad mejora el reciclaje de nutrientes y energía.
- Sistemas complejos y multiespecíficos tienden a tener mayor productividad total.

En la medida que más información sobre las relaciones entre biodiversidad, procesos ecosistémicos y productividad derivados de estudios en una variedad de agroecosistemas emerja, mayores elementos para el diseño agroecológico serán disponibles para mejorar la sustentabilidad de los agroecosistemas y la conservación de recursos.

Los dos pilares de la conversión

En la práctica, la aplicación de principios agroecológicos se centra sobre dos pilares fundamentales (**Fig. 1**):

1. el mejoramiento de la calidad del suelo, incluyendo una biota edáfica mas diversa.
2. el manejo del hábitat mediante la diversificación temporal y espacial de la vegetación, que fomenta una entomofauna benéfica así como otros componentes de la biodiversidad.

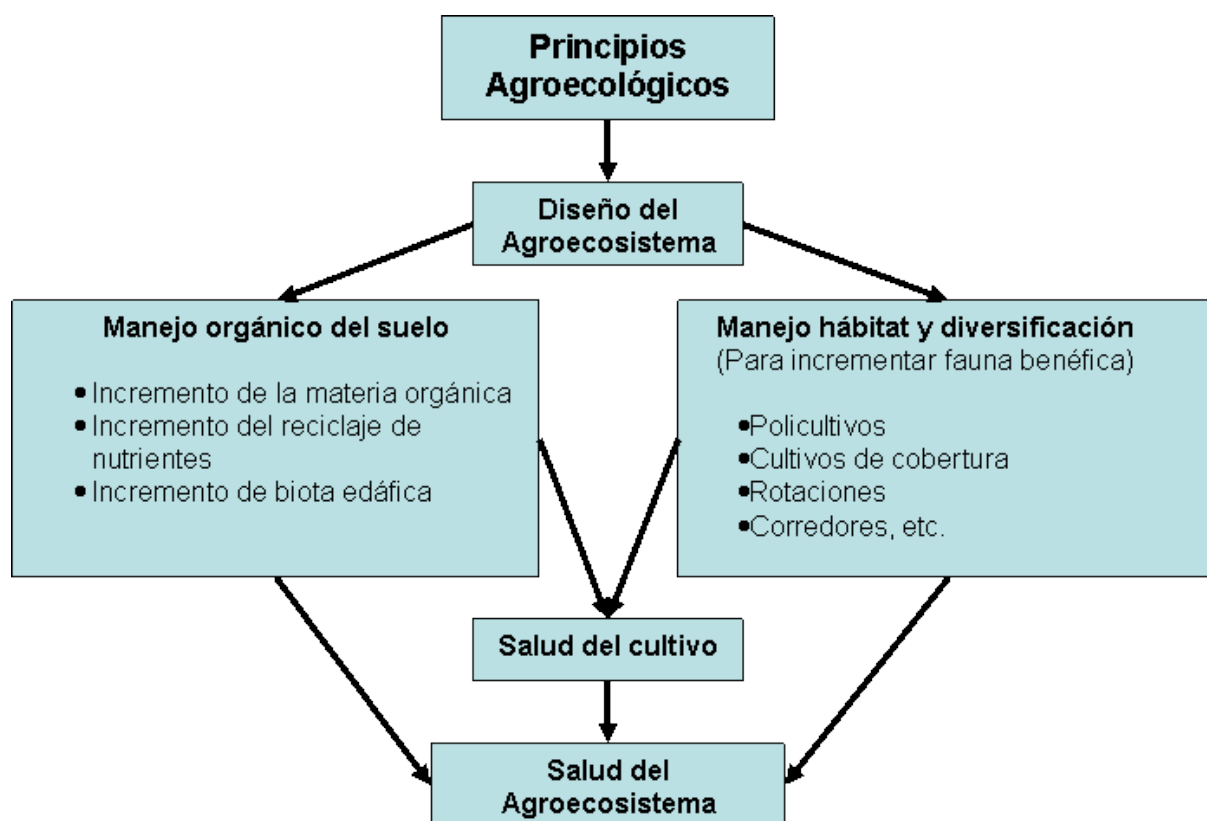


Figura 1. Pilares agroecológicos de la conversión.

La integridad del agroecosistema depende de las sinergias entre la diversidad de plantas y el funcionamiento continuo de la comunidad microbiana del suelo sustentada por un suelo rico en materia orgánica (Altieri y Nicholls, 1999). A pesar de los vínculos obvios entre la fertilidad del suelo y la protección de cultivos, la evolución de los conceptos de Manejo Integrado de Plagas (MIP) y Manejo Integrado de la Fertilidad de Suelos (MIFS) se han desarrollado separadamente (Altieri y Nicholls, 2003). Puesto que ya se conoce que muchas prácticas de manejo de suelo influyen en el manejo de plagas, y viceversa, no tiene sentido ecológico continuar con enfoques reduccionistas.

La agroecología considera que el manejo del hábitat arriba y abajo del suelo, son estrategias complementarias, puesto que al fomentar interacciones ecológicas positivas entre suelo y plagas, se origina una manera robusta y sustentable para optimizar la función total del agroecosistema (**Fig. 2**).

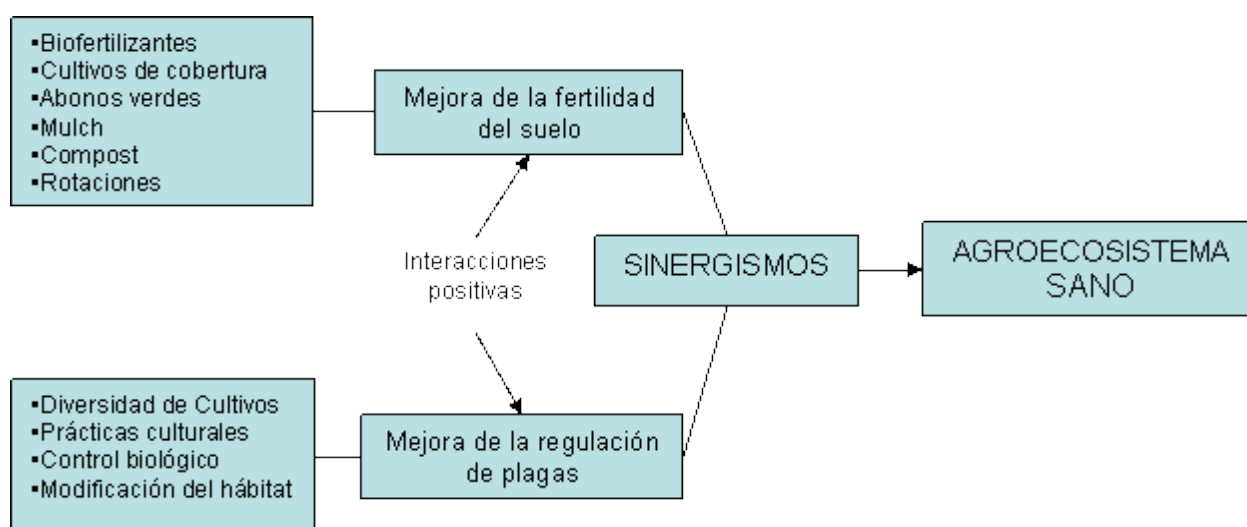


Figura 2. Sinergismos potenciales entre la gestión orgánica de la fertilidad de suelos y el manejo ecológico de plagas.

Fertilidad de suelos e incidencia de plagas

Mucho de lo que hoy conocemos acerca de la relación entre la nutrición de plantas y la incidencia de plagas proviene de estudios comparativos de los efectos de las prácticas de la agricultura orgánica y los métodos usados en la agricultura convencional sobre poblaciones de plagas específicas (Altieri y Nicholls, 2003). Las prácticas para mejorar la fertilidad de suelos pueden impactar directamente la susceptibilidad fisiológica del cultivo a los insectos plaga, ya sea al afectar la resistencia al ataque de las plantas individuales o al alterar la aceptabilidad de algunas plantas hacia ciertos herbívoros (Barker, 1975; Scriber, 1984). Algunos estudios han mostrado cómo el cambio de un manejo orgánico del suelo hacia el uso de fertilizantes químicos, ha incrementado el potencial de ciertos insectos plaga y enfermedades.

Nuevas investigaciones demuestran que la habilidad de un cultivo de resistir o tolerar el ataque de insectos plagas y enfermedades, esta ligado a las propiedades físicas, químicas y particularmente biológicas del suelo. Suelos con alto contenido de materia orgánica y una alta actividad biológica generalmente exhiben buena fertilidad, así como cadenas tróficas complejas y organismos benéficos abundantes que previenen la infección. Por otro lado, las prácticas agrícolas que causan desequilibrios nutricionales bajan la resistencia de las plantas a plagas (Magdoff y Van Es, 2000).

Las prácticas de fertilización pueden tener efectos indirectos en la resistencia de plantas a los insectos plaga, al cambiar la composición de nutrientes en el cultivo. El nitrógeno total (N) ha sido considerado un factor nutricional crítico que modifica la abundancia y el comportamiento de los insectos (Mattson, 1980; Scriber, 1984; Slansky y Rodriguez, 1987). La mayoría de los estudios señalan incrementos drásticos en el número de áfidos y ácaros en respuesta al aumento de las tasas de fertilización nitrogenada. De acuerdo a van Emden (1966), el incremento en las tasas de fecundidad y desarrollo del áfido verde del durazno *Myzus persicae*, estaba altamente correlacionado con el incremento en los niveles de nitrógeno soluble en los tejidos de la hoja. Diversos autores también han indicado el incremento de las poblaciones de áfidos y ácaros con la fertilización nitrogenada (Luna, 1988).

Revisando 50 años de investigación que relaciona la nutrición de cultivos con el ataque de insectos, Scriber (1984) encontró 135 estudios que mostraban un incremento en el daño y/o el crecimiento poblacional de insectos masticadores de hoja o ácaros en sistemas de cultivos fertilizados con nitrógeno, y menos de 50 estudios en los cuales el daño de herbívoros se redujo. Estos estudios sugieren una hipótesis con implicaciones para el patrón de uso de fertilizantes en agricultura: altas dosis de nitrógeno puede resultar en altos niveles de daño por herbívoros en los cultivos. Como corolario, podría esperarse que cultivos bajo fertilización orgánica serían menos propensos a los insectos plagas y enfermedades, dadas las menores concentraciones de Nitrógeno en el tejido de estas plantas.

La menor abundancia de diversos insectos herbívoros en sistemas manejados con bajos insumos ha sido particularmente atribuida al bajo contenido de nitrógeno de las plantas bajo manejo orgánico (Lampkin, 1990). Además, los métodos agrícolas que utilizan fertilización orgánica del suelo promueven la conservación de especies de artrópodos de todos los grupos funcionales, e incrementa la abundancia de enemigos naturales comparado con las prácticas convencionales (Moreby *et al.*, 1994; Kakimura 1995, Culliney *et al.*, 1989). Esto sugiere que la reducción de las poblaciones de plagas en sistemas orgánicos es una consecuencia, tanto de los cambios nutricionales inducidos en el cultivo por la fertilización orgánica, como también del incremento de los controles naturales de plagas. Cualquiera que sea la causa, existen muchísimos ejemplos en los cuales bajas poblaciones de insectos herbívoros han sido documentados en sistemas de bajos insumos, con una variedad de mecanismos posibles propuestos.

Un hallazgo clave, que ha contribuido a construir una base científica para un mejor entendimiento de las relaciones entre la salud de la planta y la fertilidad del suelo, ha sido el estudio realizado por científicos del USDA Beltsville Agricultural Research Center (Kumar *et al.*, 2004). Estos científicos mostraron una base molecular que explica el retraso de la senescencia de las hojas y el incremento de la tolerancia a enfermedades en plantas de tomate bajo una cobertura muerta de una leguminosa (*Vicia* sp.) como sistema de cultivo alternativo, cuando se comparaba con el mismo cultivo convencional bajo una cobertura de polietileno negro. Probablemente dada la liberación de metabolitos de carbono y nitrógeno de la *Vicia*, y su descomposición lenta, las plantas bajo la cobertura mostraron una expresión diferente de genes selectos, los cuales promovieron una mejor utilización y movilización del C y el N, promoviendo de esta forma una mayor defensa contra enfermedades y mejorando la longevidad del cultivo. Estos resultados confirman que en la producción de tomate intensivo convencional, el uso de leguminosas como cultivo de cobertura ofrece mayores ventajas como alternativa biológica a los fertilizantes comerciales, además de minimizar la erosión y la pérdida de nutrientes, mejorar la infiltración del agua, reducir la escorrentía, y promover una relación "natural" predador-presa.

Manejo de hábitat

Está bien documentado que en agroecosistemas policulturales, en general se produce un incremento en la abundancia de depredadores y parasitoides, ocasionado por una mejor disponibilidad de presas alternativas, fuentes de néctar y

microhábitats apropiados (Altieri y Nicholls, 2004). Dos hipótesis pueden explicar la menor abundancia de herbívoros en policultivos: la de la concentración de recursos y la de los enemigos naturales (Smith y McSorely, 2000). Ambas hipótesis explican que pueden haber diferentes mecanismos actuando en agroecosistemas, y tienden a sugerir los tipos de ensamblajes vegetacionales que poseen efectos reguladores y los que no, y bajo qué circunstancias agroecológicas y qué tipo de manejo (Root, 1973). De acuerdo con estas hipótesis, una menor densidad de herbívoros puede ser el resultado de una mayor depredación y parasitismo, o alternatively el resultado de una menor colonización y reproducción de plagas ya sea por repelencia química, camuflaje o inhibición de alimentación por parte de plantas no-hospederas, prevención de inmigración u otros factores (Andow, 1991). La literatura es profusa en este tema, y los lectores pueden profundizar en el mismo a través de varios libros (Dempster y Coaker, 1974; Flint y Roberts, 1988; Smith, 2000; Altieri y Nicholls, 2004; Barbosa, 1998; Landis *et al.*, 2000).

La presencia y distribución de hábitats no cultivados alrededor de campos, puede ser crítico para la supervivencia de los enemigos naturales. En general, se reconoce la importancia de la vegetación natural alrededor de los campos de cultivo como reserva de enemigos naturales de plagas (van Emden, 1966). Estos hábitats pueden ser importantes como sitios alternativos para la hibernación de algunos enemigos naturales, o como áreas que proveen recursos alimenticios tales como polen o néctar e insectos neutros para parasitoides y depredadores. Es por esto que, en agroecología, la manipulación de la vegetación natural adyacente a los campos de cultivo, se usa como una estrategia para promover el control biológico. Los cercos vivos, corredores y otros aspectos del paisaje han recibido gran atención, debido a sus efectos en la distribución y abundancia de artrópodos en las áreas adyacentes a los cultivos (Fry, 1995). Muchos estudios han documentado el movimiento de enemigos naturales desde los márgenes hacia el centro de los cultivos, demostrando un mayor nivel de control biológico en hileras de cultivos adyacentes a la vegetación natural (Pickett y Bugg, 1998; Thies y Tscharntke, 1999). Dependiendo de las especies y la movilidad de los insectos benéficos, estos efectos se pueden extender hasta 100 metros o más (Wratten, 1988).

En diseños agroecológicos a escala de paisaje, se espera que los corredores sirvan como canales para la dispersión de depredadores y parasitoides en agroecosistemas. Dada la alta relación perímetro-área de los corredores, la interacción con campos adyacentes es substancial, proporcionando protección a los cultivos dentro de un área de influencia, determinada por la distancia que se mueven los depredadores desde los corredores hacia el campo. Nuestra investigación en viñedos orgánicos, en el norte de California, sugiere que la dispersión y las subsecuentes densidades de los herbívoros y sus enemigos naturales asociados, están influenciadas por características del paisaje tales como un bosque ripario que colindaba con el viñedo, y el corredor que se diseñó y que atravesaba el viñedo. La presencia de hábitats riparios permitió un incremento de la colonización de depredadores y de su abundancia en viñedos adyacentes. Sin embargo, esta influencia estaba limitada por la distancia de dispersión de los enemigos naturales dentro del viñedo (Nicholls *et al.*, 2001). El corredor, sin embargo, amplificó esta influencia, permitiendo incrementar la dispersión y circulación de depredadores al centro del campo, incrementando el control biológico, especialmente en las hileras de viñas cercanas al corredor (primeros 30 m).

Síndrome de producción

Una de las frustraciones de los investigadores en agroecología ha sido la incapacidad de que los sistemas de bajo insumo superen a los sistemas convencionales en comparaciones lado a lado, a pesar del éxito, en la práctica, de muchos sistemas orgánicos (Vandermeer, 1997). Una posible explicación de esta paradoja la proporciona el concepto de "síndromes de producción" introducido por Andow y Hidaka (1989). Estos investigadores compararon el sistema tradicional "Shizen" de producción de arroz con el sistema moderno japonés. Aunque los rendimientos eran comparables entre los dos sistemas, las prácticas de manejo diferían en muchos aspectos. En otras palabras, el sistema Shizen funcionaba de una manera cualitativamente diferente al sistema moderno, y la variedad de prácticas de manejo usadas en cada sistema se traducían en diferencias funcionales que no podían ser explicadas por una práctica en particular.

El síndrome de producción es un conjunto de prácticas de manejo que son mutuamente adaptativas, y que juntas conllevan un funcionamiento mejor del agroecosistema. Subconjuntos de esta colección de prácticas son sustancialmente menos adaptativas, y los efectos observados sobre el comportamiento del agroecosistema no pueden ser explicados por los efectos aditivos de prácticas individuales. En otras palabras, cada sistema de producción representa un grupo distinto de prácticas de manejo que determinan interacciones ecológicas determinadas. En caso de que se quisiera convertir el sistema de arroz convencional al sistema Shizen, no bastaría con copiar las prácticas de manejo que se usan en éste, si no, más bien, se debería asegurar que las interacciones ecológicas que explican el funcionamiento del Shizen, también se dan en el sistema convencional.

Esto pone de manifiesto el hecho de que los diseños agroecológicos son específicos del sitio, y lo que se puede replicar en otro sistema no son las técnicas, sino las interacciones ecológicas y sinergias que gobiernan la sostenibilidad. No tiene sentido transferir tecnologías o prácticas de un sistema a otro, si éstas no son capaces de replicar las interacciones ecológicas asociadas con esas prácticas.

Indicadores de sustentabilidad

Uno de los desafíos que enfrentan tanto agricultores, como extensionistas e investigadores es saber en qué estado de salud se encuentra el agroecosistema después de iniciada la conversión a un manejo agroecológico. Especialistas en agricultura sostenible han ideado una serie de *indicadores de sostenibilidad* para evaluar el estado de los agroecosistemas (Gómez *et al.*, 1996; Masera *et al.*; 1999). Algunos indicadores desarrollados, consisten en observaciones o mediciones que se realizan a escala de finca, para ver si el suelo es fértil y se encuentra bien conservado, y si las plantas están sanas, vigorosas y productivas. En otras palabras, los indicadores sirven para *tomarle el pulso* al agroecosistema.

No hay duda que muchos agricultores poseen sus propios indicadores para estimar la calidad del suelo o el estado fitosanitario de su cultivo. Algunos reconocen ciertas malezas que indican, por ejemplo, un suelo ácido o infértil. Para otros, la presencia de lombrices de tierra es un signo de un suelo vivo, y el color de las hojas refleja el estado nutricional de las plantas. En cualquier zona se podría compilar una larga lista de indicadores locales, el problema que muchos de estos indicadores son específicos de sitio y cambian de acuerdo al conocimiento de los agricultores o a las condiciones de cada finca. Por esto resulta difícil realizar comparaciones entre fincas, usando resultados procedentes de indicadores diferentes.

Con el objetivo de superar este limitante, se propuso una metodología que permite seleccionar indicadores de calidad de suelo y de salud del cultivo relevantes para los agricultores y para las condiciones biofísicas de su región. Con estos indicadores ya bien definidos, el procedimiento para medir la sostenibilidad es el mismo, independiente de la diversidad de situaciones que existen en las diferentes fincas de la región diagnosticada. La *sostenibilidad* se define entonces como un conjunto de requisitos agroecológicos que deben ser satisfechos por cualquier finca, independiente de las diferencias en manejo, nivel económico, posición en el paisaje, etc. Como todas las mediciones realizadas se basan en los mismos indicadores, los resultados son comparables, de manera que se puede seguir la trayectoria de un mismo agroecosistema a través del tiempo, o realizar comparaciones entre fincas en varios estados de transición. Quizás lo más importante es que una vez aplicados los indicadores, cada agricultor puede visualizar el estado de su finca, observando qué atributos del suelo o de la planta *andan bien o mal* en relación a un umbral preestablecido. Cuando la metodología se aplica con varios agricultores, se puede visualizar las fincas que muestran valores bajos o altos de sostenibilidad. Esto es útil para que los agricultores entiendan porqué ciertas fincas se comportan ecológicamente mejor que otras, y qué hacer para mejorar los valores observados en fincas con valores menores.

Una vez definidos los requerimientos de sostenibilidad de los agroecosistemas en cuestión (diversidad de cultivos, suelo cubierto y rico en materia orgánica, baja incidencia de enfermedades, etc.), se seleccionan indicadores de calidad de suelo y de indicadores de salud del cultivo (6 a 10 de cada categoría).

Cada indicador se estima en forma separada y se le asigna un valor de 1 a 10 (siendo 1 el valor menos deseable, 5 un valor moderado o medio, y 10 el valor preferido), de acuerdo con las características que presenta el suelo o el cultivo -según atributos que deben ser definidos para cada indicador. Es importante que investigadores y agricultores, en forma conjunta, definan los criterios para dar valor a cada indicador seleccionado. Por ejemplo en el caso del indicador *estructura de suelo*, se asigna un valor 1 a aquel suelo que es pulverulento, sin gránulos (o agregados) visibles, un valor 5 a un suelo con algo de estructura granular, y cuyos gránulos se rompen fácilmente bajo suave presión de los dedos, y un valor 10 a un suelo friable y granuloso, con agregados que mantienen su forma aún después de humedecidos y sometidos a una presión leve.

Los indicadores de salud del cultivo se refieren a la apariencia del cultivo, el nivel de incidencia de enfermedades, la tolerancia del cultivo a estrés (sequía u otro factor) y a malezas, crecimiento del cultivo y raíces, así como rendimiento potencial. Las observaciones sobre niveles de diversidad vegetal (número de especies de árboles de sombra, e incluso malezas dominantes), diversidad genética (número de variedades de café), diversidad de la vegetación natural circundante, y tipo de manejo del sistema (ej. en transición a orgánico con muchos o pocos insumos externos), se hacen para evaluar el estado de la infraestructura ecológica del agroecosistema, asumiendo que un agroecosistema con mayor diversidad específica y genética, un manejo diversificado que aprovecha las sinergias de la biodiversidad, y que está rodeado por vegetación natural, tiene condiciones de entorno más favorables para la sostenibilidad (Altieri y Nicholls, 2004).

Una vez que se asignan los valores a cada indicador, se suman los valores obtenidos y se divide por el número de indicadores observados, obteniéndose un valor promedio de calidad de suelo, y otro de salud del cultivo. Las fincas que muestran valores de calidad de suelo y/o de salud del cultivo inferior a 5 se consideran por debajo del *umbral de sostenibilidad* y, por lo tanto, necesitan manejos que corrijan aquellos indicadores que exhiben valores bajos. Los valores de los indicadores son más fáciles de observar graficando los valores obtenidos en cada finca en una figura tipo *ameba* (**Fig. 3**), en la que es posible visualizar el estado general de la calidad del suelo o la salud del cultivo, considerando que cuanto más se aproxime la ameba a un círculo (valor 10), más sostenible se considera el sistema. La ameba permite también observar qué indicadores están débiles (por debajo de 5), por lo que permite priorizar el tipo de intervenciones agroecológicas necesarias para corregir estos atributos del suelo, el cultivo o el agroecosistema. A veces, interviniendo para corregir un solo atributo (incrementando la diversidad de especies o el nivel de materia orgánica en el suelo) es suficiente para corregir una serie de otros atributos. Por

ejemplo, la adición de materia orgánica, además de incrementar la capacidad de almacenamiento de agua, puede aumentar la actividad biológica del suelo, la que, a su vez, puede mejorar la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes.

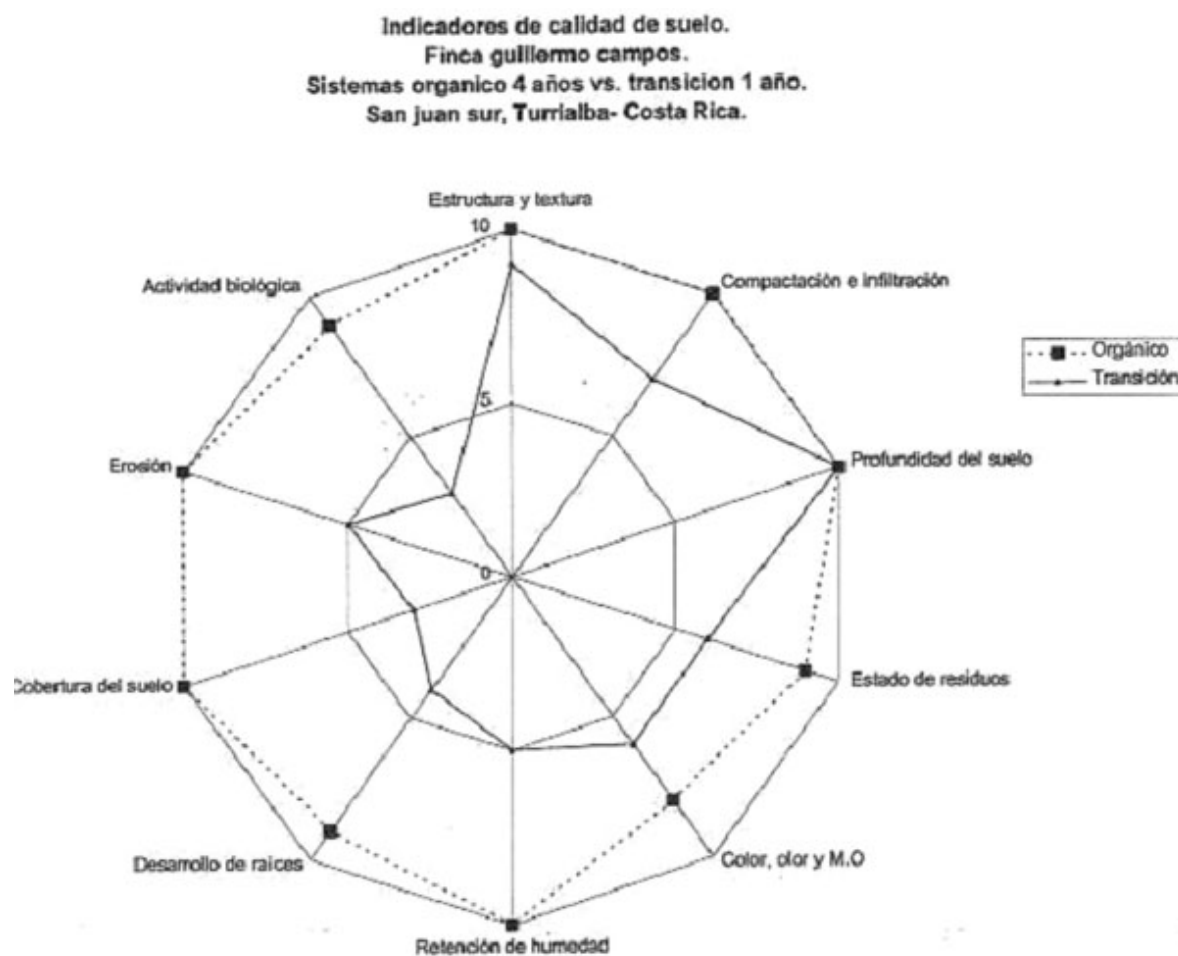


Figura 3. Representación gráfica de valores de indicadores de sustentabilidad en dos sistemas de producción de café.

Conclusiones

Uno de los motivos por los que muchos agricultores realizan una conversión desde un sistema monocultivo manejado con insumos agroquímicos, a un sistema más diversificado, es lograr una producción de calidad y estable, poco dependiente de insumos extremos, con el objetivo de disminuir los costos de producción, y a la vez conservar recursos naturales de la finca tales como suelo, agua y agrobiodiversidad (Altieri, 1995). El objetivo final de los investigadores que desarrollan y promueven técnicas de manejo orgánico, es llegar a diseñar agroecosistemas que posean una alta resistencia a plagas y enfermedades, una alta capacidad de reciclaje y de retención de nutrientes, así como altos niveles de biodiversidad (Gliessman, 1998). Un sistema más diversificado, con un suelo rico en materia orgánica y biológicamente activo se considera un sistema no degradado, robusto y productivo. En otras palabras, un agroecosistema rico en biodiversidad, la cual, a partir de una serie de sinergismos, subsidia la fertilidad edáfica, la fitoprotección y la productividad del sistema, se dice ser *sustentable o saludable* (Gliessman, 1998).

Esta conversión se logra enfatizando dos pilares agroecológicos claves: la mejora de la calidad del suelo y la diversificación del agroecosistema, ya que la integridad del agroecosistema depende de las sinergias entre la diversidad de plantas y el funcionamiento continuo de la comunidad microbiana del suelo, sustentada por un suelo rico en materia orgánica. Phelan *et al.*, (1995) enfatizan la necesidad de considerar otros mecanismos cuando se examina los vínculos entre el manejo de la fertilidad y la susceptibilidad de los cultivos a los insectos plaga. Sus estudios demuestran que la preferencia de oviposición de los insectos defoliadores por ciertas plantas puede estar mediada por las diferencias en el manejo de la fertilidad del suelo. Por lo tanto, los bajos niveles de plaga reportados extensamente en los sistemas orgánicos pueden, en parte, deberse a la resistencia de las plantas a las plagas, relacionada con diferencias bioquímicas o de nutrientes minerales en los cultivos bajo tales prácticas de manejo. En efecto, estos resultados proveen una evidencia interesante para apoyar la idea de que el

manejo adecuado y prolongado de la materia orgánica del suelo puede inducir una mayor resistencia de las plantas a los insectos plaga.

Por otro lado un manejo adecuado de la biodiversidad por encima del suelo (*Ferrosistema*), conlleva al establecimiento de la infraestructura necesaria que provee los recursos (polen, néctar, presas alternativas, refugio, etc.) para una óptima diversidad y abundancia de enemigos naturales. Estos recursos deben integrarse en el paisaje agrícola de una manera espacial y temporal que sea favorable para los enemigos naturales y, por supuesto, que sea fácil de implementar por los agricultores. El éxito depende de: a) la selección de las especies vegetales más apropiadas, b) la entomofauna asociada a la biodiversidad vegetal, c) la manera como los enemigos naturales responden a la diversificación y d) la escala espacial a la cual operan los efectos reguladores de la manipulación del hábitat.

La relación entre la biodiversidad por encima y por debajo del suelo es actualmente una área de activa investigación. Un estudio reciente demostró que la actividad de los organismos por debajo del suelo puede afectar el fenotipo de la planta, induciendo la tolerancia de plantas a herbívoros y patógenos (Blouin *et al.*, 2005). Este estudio demostró una disminución del 82% de las plantas infectadas por nematodos cuando estaban presentes las lombrices de tierra. Aunque las lombrices de tierra no tenían un efecto directo sobre la población de nematodos, en su presencia, la biomasa de raíces no se vio afectada por nematodos, y se evitó la esperada inhibición de la fotosíntesis. Esta es la primera vez que se observa cómo la presencia de lombrices de tierra pueden reducir la infestación de nematodos en plantas. Aparentemente, la presencia de lombrices en la rizosfera induce cambios sistémicos en la expresión de ciertos genes de la planta, conllevando un incremento en la actividad fotosintética y una mayor concentración de clorofila en hojas (Blouin *et al.*, 2005).

Este tipo de estudios que realizan un análisis integrado del agroecosistema, mejora progresivamente nuestra comprensión del papel de la biodiversidad en la agricultura, y las relaciones ecológicas entre componentes biológicos por encima y por debajo del suelo. Tal entendimiento constituye un paso clave hacia la construcción de una estrategia innovadora y verdaderamente agroecológica de conversión que combina la diversificación de cultivos y el mejoramiento orgánico del suelo.

Referencias

- Altieri, M. A. y D. L. Letourneau. 1982. Vegetation management and biological control in agroecosystems. *Crop Protection* 1: 405-430.
- Altieri, M. A. 1991. How best can we use biodiversity in agroecosystems. *Outlook on Agriculture* 20: 15-23.
- Altieri, M.A. 1995. *Agroecology: the science of sustainable agriculture*. Westview Press, Boulder, CO.
- Altieri, M.A., Nicholls, C.I. 1999 Biodiversity, ecosystem function and insect pest management in agricultural systems In: *Biodiversity in Agroecosystems*. (Eds, Collins, W. W. and Qualset, C. O.) CRC Press, Boca Raton, pp. 69-84.
- Altieri, M.A., Nicholls, C.I. 2003. Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems. *Soil and Tillage Research* 72: 203.
- Altieri MA, Nicholls CI. 2004. *Biodiversity and pest management in agroecosystems*: Binghamton USA: Food Products Press
- Andow, D. A. 1991. Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual Review of Entomology* 36: 561-586.
- Andow, D. y K. Hidaka 1989 Experimental natural history of sustainable agriculture: syndromes of production. *Agric. Ecosyst. Environ.* 27: 447-462.
- Barbosa, P. 1998. *Conservation Biological Control*. Academic Press, New York. 396p.
- Barker, A. (1975). Organic vs. inorganic nutrition and horticultural crop quality. *HortScience* 10: 12-15.
- Blouin, M., Zuily-Fodil, Y., Pham-Thi, A.-T., Laffray, D., Reversat, G., Pando, A., Tondoh, J., Lavelle, P. 2005. Belowground organism activities affect plant aboveground phenotype, inducing plant tolerance to parasites. *Ecology Letters* 8: 202-208.
- Culliney, T y D. Pimentel. 1986. Ecological effects of organic agricultural practices in insect populations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 15: 253-256.
- Dempster, J. P. y Coaker, T. H. 1974. Diversification of crop ecosystems as a means of controlling pests. In: Jones, D. P. and

Solomon, M. E. (eds.). *Biology in Pest and Disease Control*. John Wiley, New York, pp. 106-114.

Flint, M. L. y Roberts, P. A. 1988. Using crop diversity to manage pest problems: some California examples. *American Journal of Alternative Agriculture* 3: 164-167.

Fry, G. 1995. Landscape ecology of insect movement in arable ecosystems. In: Ecology and integrated farming systems. D. M. Glen et al. (eds.). John Wiley and Sons, Bristol, UK.

Gliessman, S. R. 1998. *Agroecology: ecological processes in Sustainable Agriculture*. Ann Arbor Press, Ann Arbor, MI.

Gomez, A.A., D.E. Sweete, J.K. Syers y K.J. Coughlan. 1996. Measuring sustainability of agricultural systems at the farm level. In: *Methods for assessing soil quality*. SSSA Special Pub. 49. Madison, Wisconsin.

Kajimura, T. 1995. Effect of organic rice farming on planthoppers: Reproduction of white backed planthopper, *Sogatella furcifera* (Homoptera: Delphacidae). *Res. Popul. Ecol.* 37: 219-224.

Kumar, V., Mills, D.J., Anderson, J.D., Mattoo, A.K. 2004. An alternative agriculture system is defined by a distinct expression profile of select gene transcripts and proteins. *PNAS* 101: 10535-10540.

Lampkin, N. 1990. *Organic Farming*. Farming Press Books, Ipswich, UK.

Landis, D.A., S.D. Wratten and G.A. Gurr. 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology* 45: 175-201.

Luna, J.M. 1988. In *Global perspectives on agroecology and sustainable agricultural systems*. Proc. Sixth. Int. Sci. Conference of IFOAM Santa Cruz, CA, pp. 589-600.

Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., Niggli, U. 2002. Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science* 296: 1694-1697.

Magdoff, F., van Es, H. 2000. *Building soils for better crops*. SARE, Washington DC.

Masera, O., M. Astier y S. Lopez-Ridaura. 1999. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS. Mundiprensa, GIRA, UNAM, Mexico D.F.

Mattson, W.J., Jr., 1980. Herbivory in relation to plant nitrogen content. *Annual Review of Ecology and Systematics* 11: 119-161.

Moreby, S.J., Aebischer, N.J., Southway, S.E., Sotherton, N.W. 1994. A comparison of flora and arthropod fauna of organically and conventionally grown winter wheat in southern England. *Annals of Applied Biology* 12: 13-27.

Nicholls, C.I.; M.P. Parrella and M.A. Altieri. 2001. Effects of a vegetational corridor on the abundance and dispersal of insect biodiversity within a northern Californian organic vineyard. *Landscape Ecology* 16:133-146

Phelan, P.L., Mason, J.F., Stinner, B.R. 1995. Soil fertility management and host preference by European corn borer, *Ostrinia nubilalis*, on *Zea mays*: a comparison of organic and conventional chemical farming. *Agric. Ecosyst. Environ.* 56: 1-8.

Pickett C.H. and R. Bugg. 1998. *Enhancing Biological Control: habitat management to promote natural enemies of agricultural pests*. University of California Press. Berkeley. 422p.

Pimentel, D., Warneke, A. 1989. Ecological effects of manure, sewage sludge and other organic wastes on arthropod populations. *Agricultural Zoology Reviews* 3: 1-30.

Power, A.G. 1999. Linking ecological sustainability and world food needs. *Environment, Development and Sustainability* 1: 185-196.

Root, R. B. 1973. Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: the fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecological Monographs* 43: 95-124.

- Scriber, J.M. 1984. Nitrogen nutrition of plants and insect invasion In: *Nitrogen in crop production*. (Ed, Hauck, R. D.) American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Slansky, F., Rodriguez, J.G. 1987. *Nutritional ecology of insects, mites, spiders and related invertebrates*. Wiley, New York.
- Smith, H.A. and R. McSorely. 2000. Intercropping and pest management: a review of major concepts. *American Entomologist* 46:154-161.
- Thies, C. and T. Tscharntke.1999. Landscape structure and biological control in agroecosystems. *Science* 285: 893-895.
- Vandermeer, J. 1997 Syndromes of production: an emergent property of simple agroecosystem dynamics. *J. Environ.Manage.* 51: 59-72.
- Van der Putten, W.H., Vet, L.E.M., Harvey, J.A., Wackers, F.L. 2001. Linking above- and belowground multitrophic interactions of plants, herbivores, pathogens, and their antagonists. *Trends in Ecology and Evolution* 16: 547-554.
- van Emden, H.F. 1966. Studies on the relations of insect and host plant. III. A comparison of the reproduction of *Brevicoryne brassicae* and *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) on brussels sprout plants supplied with different rates of nitrogen and potassium. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 9: 444-460.
- Wardle, D.A., Bardgett, R.D., Klironomos, J.N., Setälä, H., van der Putten, W.H., Wall, D.H. 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science* 304: 1629-33.
- Wratten, S. D. 1988. The role of field margins as reservoirs of natural enemies. In: *Environmental management in agriculture*. J. R. Park (Ed.). Belhaven Press, London.