

AGROECOLOGIA: PRINCIPIOS PARA LA CONVERSIÓN Y EL REDISEÑO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

Clara I. Nicholls¹, Miguel A. Altieri², Luis L Vázquez³

¹International and Area Studies, University of California, Berkeley, USA. Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología (SOCLA); ²Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, USA. Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología (SOCLA); ³Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología (SOCLA)-Cuba. E-mail: nicholls@berkeley.edu.

Resumen

Los agroecosistemas modernos requieren un cambio sistémico, pero los nuevos sistemas de cultivo rediseñados no emergerán de la simple aplicación de un conjunto de prácticas (rotaciones, compost, cultivos de cobertura, etc.), sino más bien de la aplicación de principios agroecológicos ya bien definidos. Estos principios se pueden aplicar a través de diversas prácticas y estrategias, y cada uno tendrá diferentes efectos sobre la productividad, estabilidad y flexibilidad del sistema productivo. Al romper la naturaleza del monocultivo de los sistemas agrícolas con la diversificación agroecológica, se promueven procesos ecológicos naturales tales como reciclaje óptimo de nutrientes y acumulación de materia orgánica, activación biológica del suelo, flujos cerrados de energía, conservación de agua y suelo y balance de las poblaciones de plagas y enemigos naturales, todos procesos claves en el mantenimiento de la salud del agroecosistema, su productividad y su capacidad de auto sostenerse. Mediante la promoción de la biodiversidad funcional, se logra un objetivo importante del proceso de conversión: *el fortalecimiento de las funciones ecológicas* del agroecosistema, lo que permite a los agricultores eliminar gradualmente los insumos al apoyarse en procesos ecológicos e interacciones claves del agroecosistema.

Palabras claves: Agroecología, conversión, sistemas diversificados, sustentabilidad, resiliencia.

Summary

Agroecology: principles for the conversion and redesign of farming systems

Modern agroecosystems require systemic change, but new redesigned farming systems will not emerge from simply implementing a set of practices (rotations, composting, cover cropping, etc.), but rather from the application of already well defined agroecological principles. These principles can be applied by way of various practices and strategies, and each will have different effects on productivity, stability and resiliency within the farm system. By breaking the monoculture nature of farming systems, agroecological diversification mimic natural ecological processes leading to optimal recycling of nutrients and organic matter turnover, soil biological activation, closed energy flows, water and soil conservation and balanced pest-natural enemy populations, all key processes in maintaining the agroecosystem's health, productivity and its self-sustaining capacity. By enhancing functional biodiversity, a major goal of the conversion process is achieved: strengthening the weak ecological functions in the agro-ecosystem, allowing farmers to gradually eliminate inputs altogether by relying instead on ecological processes and interactions.

Keywords: Agroecology, conversion, diversified farming systems, sustainability, resilience

INTRODUCCIÓN

La agricultura moderna ha consistido en la sustitución de las comunidades vegetales naturales por comunidades de cultivos homogéneas. La manipulación humana y la alteración de los ecosistemas con el fin de establecer la producción agrícola, ha convertido los

agroecosistemas modernos en sistemas altamente simplificados, hasta el punto de que son estructural y funcionalmente muy diferentes a los ecosistemas naturales. Las características inherentes de autorregulación de las comunidades naturales se pierden cuando los seres humanos modifican los ecosistemas para crear monocultivos (Altieri y Nicholls 2004). Entre más intensamente se

modifican estas comunidades, más graves y frecuentes son los desequilibrios ecológicos de los sistemas agrícolas simplificados.

La dependencia de la humanidad en sistemas de producción de monocultivos homogéneos ya no es socialmente, económicamente y ecológicamente deseable, ya que estos sistemas comprometen la biodiversidad, utilizan los recursos de manera ineficiente, son altamente dependientes de energía fósil, imprimen una huella ecológica inmensa, son susceptibles a plagas y también son vulnerables a la variabilidad climática (Thiessen *et al.* 2015). Un reciente análisis llegó a la conclusión que la mayoría de los principales cultivos son impresionantemente genéticamente uniformes y, por tanto, extremadamente vulnerables a epidemias de enfermedades y fenómenos climáticos (Heinemann *et al.* 2013). Esta uniformidad se deriva de poderosas fuerzas económicas y legislativas que favorecen el monocultivo y la simplificación. De hecho, el aumento en la demanda de maíz como materia prima para la producción de etanol, está alterando la diversidad a nivel de paisaje y, en consecuencia, los servicios que proporcionan estos ecosistemas. Por ejemplo, en cuatro estados del Medio Oeste estadounidense el reciente incremento en la siembra de monocultivos de maíz, impulsado por los biocombustibles resultaron en una menor diversidad del paisaje y una disminución de la oferta de enemigos naturales de plagas insectiles en campos de soya que redujo en un 24% los servicios de control biológico. Esta pérdida del servicio ecológico del control biológico, le costó a los productores de soya en estos estados un estimado de 58 millones de dólares por año, ya que hubo una reducción en el rendimiento y un mayor uso de pesticidas (Landis *et al.* 2008). Así mismo, investigadores encontraron en un estudio de dos años de 17 sitios en un radio de 1500 m- en China, que el uso de fertilizantes nitrogenados y la expansión de los cultivos de cereales, ponía en peligro los enemigos naturales para el control de áfidos, lo que provocó una disturbancia en las relaciones interespecificas, que incrementó la dependencia en pesticidas (Zhao *et al.* 2015).

Aparte de la implementación de nuevas variedades de cultivos y la aplicación de más de 5.2 millones de libras de pesticidas en todo el mundo, desde el punto de vista ecológico, poco se ha hecho para reducir la susceptibilidad de los agroecosistemas industriales a plagas o para mejorar su adaptabilidad a los cambios en los patrones climáticos (Rosenzweig y Hillel 2008). Muchos agroecólogos han sugerido que el uso de estrategias de manejo agroecológico que rompen la naturaleza de los monocultivos y favorecen la diversidad a nivel de campo, así como la heterogeneidad del paisaje, representan un camino sólido para incrementar la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia de la producción agrícola (Altieri 1995, De Schutter 2010). Esta recomendación se basa en observaciones y evidencias experimentales

que afirman las siguientes tendencias: (a): cuando los agroecosistemas son simplificados, grupos funcionales de especies son removidos alterando el equilibrio del sistema, pasando de un estado deseado a un estado funcional menos deseado, afectando su capacidad para responder a los cambios y para generar servicios ecosistémicos y (b) cuanto mayor es la diversidad vegetacional de los agroecosistemas, mayor será la capacidad del agroecosistema para amortiguar los problemas de plagas y enfermedades, así como los cambios en los regímenes de precipitación y temperatura (Folke 2006).

La investigación ha demostrado que la diversificación de los agroecosistemas puede revertir las tendencias a la reducción en los rendimientos a largo plazo, ya que la diversidad de cultivos y de variedades desplegadas en diversos esquemas temporales y espaciales responden de forma diferente a las shock climáticos externos. En una revisión reciente, investigadores encontraron que, en comparación con los monocultivos convencionales, los sistemas agrícolas diversificados presentan sustancialmente mayor biodiversidad, mejor calidad del suelo, y mayor capacidad de retención de agua, y mostraron una mayor eficiencia energética y una mayor resiliencia al cambio climático. En relación a los monocultivos convencionales, los sistemas agrícolas diversificados mejoran la regulación de malezas, enfermedades y plagas, al mismo tiempo que incrementan los servicios de polinización (Kremen y Miles 2012).

A medida que los agricultores inician la conversión agroecológica de sus sistemas agrícolas, se empiezan a observar lentamente varios cambios en las propiedades del suelo, en las condiciones del microclima, en la diversidad vegetal y en la fauna benéfica asociada, creando los cimientos para mejorar la salud del agroecosistema, la productividad de los cultivos y la resiliencia (Lotter 2003). Los agroecosistemas sometidos a la conversión ecológica funcionan como sistemas complejos con propiedades emergentes y, por lo tanto, las decisiones de manejo deberán tener en consideración el comportamiento especial y las propiedades de los sistemas complejos (Vandermeer *et al.* 1998). No obstante, es evidente que no es la diversidad "per se" lo que mejora la estabilidad de los agroecosistemas, sino la 'biodiversidad funcional', un conjunto de clústeres de biota que desempeñan papeles claves en la prestación de los servicios ecológicos (fertilidad del suelo, regulación de plagas, etc.) en los agroecosistemas, reduciendo así la necesidad de insumos agrícolas externos (Gliessman 1998).

En este trabajo, sostenemos que los agroecosistemas modernos requieren cambios sistémicos, pero los nuevos rediseños de los sistemas agrícolas no surgirán a partir de una receta que aplica un conjunto de prácticas (rotaciones, compostaje, cultivos de cobertura, etc.), sino a partir de la aplicación de ya bien definidos principios agroecológicos (Altieri 1995, Gliessman 1998). Estos principios pueden ser aplicados por medio de diver-

sas prácticas y estrategias, y cada uno tiene diferentes efectos sobre la productividad, estabilidad y resiliencia dentro del sistema agrícola. El manejo agroecológico conduce a un buen reciclaje de nutrientes y acumulación de materia orgánica óptimo, a una alta eficiencia energética, a la conservación de agua y suelos y a un equilibrio entre las poblaciones de plagas y enemigos naturales, todos procesos claves para el mantenimiento de la productividad del agroecosistema y su capacidad autosuficiente (Altieri 2002a). El desafío de alinear los sistemas agrícolas con principios agroecológicos es inmenso, especialmente en el actual contexto del desarrollo agrícola donde la especialización, la productividad a corto plazo y la eficiencia económica son enfatizados.

LA CONVERSIÓN DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

La reversión de los agroecosistemas que ya han sufrido una simplificación ecológica importante, implica un proceso de conversión de un monocultivo altamente dependiente de insumos químicos a un sistema agrícola diversificado de bajos insumos externos (Lamine y Bellon 2009). La mayoría de los agricultores inician el proceso de conversión lentamente, teniendo tiempo para adquirir experiencia con un sistema de cultivo más diverso, experimentando en pequeña escala y reduciendo así los riesgos con el fin de aprender a ser lo suficientemente flexibles para adaptarse a las condiciones cambiantes.

Etapas de la transición:

La conversión al manejo con base agroecológica afecta a todo el sistema de cultivo, no solo a una parte del sistema. Las rotación de cultivos es una de las principales prácticas de manejo que abrumadoramente los agricultores orgánicos utilizan durante la conversión, ya que esta influye en la producción de forraje, en el mejoramiento de la fertilidad y es una parte integral de las estrategias del manejo de malezas, plagas, y enfermedades. El mayor énfasis durante la conversión es el mejoramiento de la calidad del suelo mediante la incorporación de materia orgánica a través de la aplicación de estiércoles o compost, así como el uso de cultivos de cobertura como abonos verdes en una rotación bien planeada. En la mayoría de los sistemas orgánicos, los cultivos de cobertura son la fuente más importante de carbono orgánico necesarios para la comunidad microbiana del suelo y un adecuado pool de nutrientes (Lotter 2003). Lamentablemente, muchos agricultores orgánicos, empujados por las fuerzas del mercado que privilegian la especialización, tienden a sustituir las prácticas tales como las rotaciones, cultivos de cobertura, etc. con un conjunto de paquetes de insumos, que son igualmente intensivos en energía y capital; creando un sistema de "sustitución de insumos"; tornando así sus operaciones más dependientes.

Muchos autores han conceptualizado la conversión como un proceso de transición con tres fases marcadas (Mc Rae *et al.* 1990):

1. Aumento de la eficiencia en la utilización de insumos mediante el manejo integrado de plagas o el manejo integrado de la fertilidad del suelo.
2. La sustitución de insumos o la sustitución de insumos ambientalmente benignos (insecticidas botánicos o insecticidas microbianos, biofertilizantes, etc.).
3. Rediseño del sistema: la diversificación mediante un ensamblaje vegetal y/o animal, que favorece las sinergias, de modo que el agroecosistema puede patrocinar su propia fertilidad del suelo, la regulación natural de plagas y la productividad de los cultivos.

Muchas de las prácticas que actualmente están siendo promovidas como componentes de la agricultura sostenible caen en las categorías 1 y 2. Estas etapas ofrecen claras ventajas en términos de reducción de los impactos ambientales a medida que se disminuye el uso de insumos de agroquímicos, y a menudo puede proporcionar ventajas económicas en comparación con los sistemas convencionales. Los cambios paulatinos, suelen ser más aceptados por los agricultores, ya que una drástica modificación de su sistema productivo, puede considerarse como altamente riesgosa. Pero, ¿la adopción de prácticas que aumentan la eficiencia en la utilización de insumos o que sustituye los insumos agroquímicos por otros *biológicos*, pero que deja intacta la estructura de los monocultivos, realmente tiene el potencial para llevar a un rediseño de los sistemas productivos agrícolas? Una verdadera conversión agroecológica pone en entredicho el monocultivo y la dependencia de insumos externos (Lamine y Bellon 2009).

En general, la sintonía en la utilización de insumos a través de enfoques tales como la Manejo Integrado de Plagas (MIP) ofrece poco para los agricultores en transición. En la mayoría de los casos, el MIP se traduce en un "manejo inteligente de pesticidas"; ya que este enfoque solo se centra en el uso selectivo de pesticidas de acuerdo a un umbral económico pre-determinado de las plagas, que a menudo se "supera" en situaciones de monocultivo. La sustitución de insumos utilizados por la gran mayoría de agricultores orgánicos sigue el mismo paradigma de la agricultura convencional; superar el factor limitante, pero esta vez con insumos orgánicos o biológicos. Muchos de estos "*insumos alternativos*" se producen comercialmente en grandes empresas y los agricultores siguen siendo dependientes de los proveedores de insumos, aunque ahora biológicos (Rosset y Altieri 1996).

En California, los agricultores orgánicos de uvas y fresas aplican entre 12 a 18 diferentes tipos de insumos biológicos por temporada. Además de aumentar los costos de producción, muchos productos utilizados para un propósito pueden afectar otros aspectos del sis-

tema. Por ejemplo, el azufre que se utiliza ampliamente para el control de enfermedades foliares de uvas, también pueden eliminar poblaciones de *Anagrus*, avispas parasíticas, principales reguladores de plagas de cicadélidos o a su vez puede también afectar los ácaros fitoseidos que controlan las arañas rojas en fresas. Por consiguiente, los agricultores quedan atrapados en un lo que se conoce como el "espiral de los insumos orgánicos"

Gliessman (2010) afirma que el mejoramiento en la eficiencia de la utilización de insumos y la sustitución de insumos no son suficientes para hacer frente a los desafíos de la agricultura moderna. En cambio, el autor argumenta que los sistemas agrícolas deben ser rediseñados basado en un nuevo conjunto de relaciones ecológicas. Esto implica abordar la conversión como una transición ecológica de la agricultura basada en nociones de agroecología y sostenibilidad.

El rediseño del sistema surge de la aplicación de los principios agroecológicos que conducen a la transformación de la estructura y función del agroecosistema para promover un manejo orientado a asegurar los siguientes procesos (Altieri y Nicholls 2012):

1. Aumentar la diversidad arriba y abajo del suelo
2. Incrementar la producción de biomasa y el contenido de materia orgánica del suelo
3. Uso eficiente de los nutrientes del suelo, agua, energía solar, semillas, los organismos del suelo, polinizadores y enemigos naturales
4. Planificación óptima de las secuencias y combinaciones de cultivos y/o animales
5. Mejoramiento de la complementariedad funcional y las interacciones entre suelo, cultivos y componentes bióticos.

Finalmente el rediseño del sistema consiste en la creación de una infraestructura ecológica que a través de la diversificación a escala de parcela, finca y paisaje se fomentan las interacciones ecológicas que mejoran la fertilidad del suelo, el ciclo de nutrientes y la retención y almacenamiento de agua, la regulación biótica de plagas y enfermedades, la polinización, y otros servicios esenciales del ecosistema (Altieri 2002b). Los costos asociados (mano de obra, recursos y dinero) para establecer la infraestructura de la finca agroecológica (cercas vivas, rotación, hábitats para insectos benéficos, etc.) durante la fase de rediseño tienden a ser altos en los primeros 3 a 5 años. Una vez que la rotación y otros diseños vegetacionales (cultivos de cobertura, policultivos, bordes, etc.) comienzan a prestar los servicios ecológicos a la finca, los procesos ecológicos claves (ciclo de nutrientes, la regulación de plagas, etc.) se ponen en marcha y la necesidad de insumos externos, así como los costos de mantenimiento empiezan a disminuir, ya que la biodiversidad funcional de la finca patrocina las funciones ecológicas (Fig. 1).

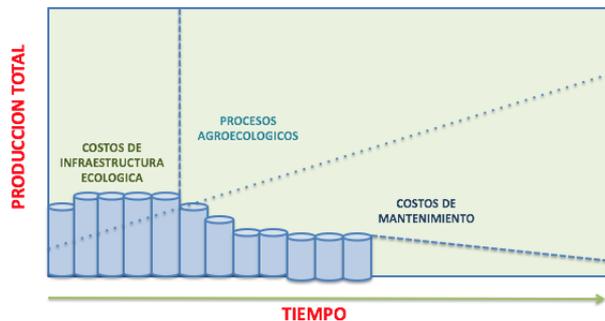


Figura 1. Costos de mantenimiento durante la transición del sistema productivo hacia el rediseño agroecológico

La agroecología promueve principios en lugar de reglas o recetas que deben ser tenidos en cuenta en el proceso gradual de conversión de sistemas convencionales a sistemas de producción agroecológica. Los agricultores son retados cada vez más a hacer uso de sus habilidades intelectuales y de comunicación a lo largo de este período de transición, porque deberán optimizar el uso eficiente de los insumos, substituir insumos sintéticos por orgánicos y re-diseñar el sistema de producción. Esta transición es muy intensiva en conocimiento y requiere de un auto-estudio, e idealmente una renuencia a asumir riesgos importantes, exigiendo de 3 a 5 años para la creación de un agroecosistema. La agroecología como enfoque agrícola puede ser más intensiva en mano de obra, pero los beneficios tales como el desarrollo de la capacidad, los servicios a los ecosistemas vecinos, y el suministro de alimentos saludables, justifica el esfuerzo extra que el agricultor pone al rediseñar su sistema agrícola (Timmermann y Felix 2015).

Cambios en la biología de los suelos y la productividad de los cultivos

Después de 3 a 4 años de conversión, los cambios en las propiedades del suelo se vuelven aparentes. En general, los suelos manejados orgánicamente presentan mayor actividad biológica que suelos manejados convencionalmente. En estudios de largo plazo realizados en Suiza, investigadores encontraron que la longitud de las raíces de cultivos colonizadas por micorrizas en los sistemas de agricultura orgánica fue 40% superior a la de los sistemas convencionales (Mader *et al.* 2002). De particular importancia es el hecho de que las plantas colonizadas por micorrizas suelen presentar mayor biomasa y rendimientos significativamente mayores en comparación con las plantas no micorrizadas bajo condiciones de estrés hídrico, ya que las micorrizas aumentan la eficiencia del uso del agua (Li *et al.* 2007). La biomasa y abundancia de lombrices fueron también superiores por un factor de 1,3 a 3,2 en las parcelas orgánicas en comparación con los convencionales. Además la actividad y densidad de depredadores tales como carábidos, estaflinidos y arañas en las parcelas orgánicas fue casi el doble que en las parcelas convencionales.

El porcentaje de nitrógeno, fósforo y potasio, pH, materia orgánica y algunos micronutrientes aumentan con el tiempo, muchas veces alcanzando valores significativamente mayores que al inicio de la conversión (Pimentel *et al.* 2005). Muchos estudios han demostrado un mejor rendimiento de la agricultura orgánica que los sistemas convencionales medidos utilizando diversos parámetros de sostenibilidad, incluyendo la riqueza y abundancia de especies, fertilidad del suelo, asimilación de nitrógeno por los cultivos, infiltración y capacidad de almacenamiento del agua y eficiencia energética (Kremen y Miles 2012).

En cuanto a productividad, estudios realizados en Suiza mostraron que el promedio de los rendimientos de los cultivos orgánicos fueron sólo un 20% menor durante un período de 21 años, indicando una producción eficiente. En los sistemas orgánicos, la energía necesaria para producir una unidad de biomasa (peso seco) fue de 20 a 56% menor que en sistemas convencionales donde fueron de 36 a 53% más bajo por unidad de área (Mader *et al.* 2002). Generalmente, los rendimientos disminuyen durante los primeros 3 a 5 años de la conversión, pero como lo indica un reciente meta-análisis, los rendimientos de los sistemas orgánicos son sólo el 19,2% ($\pm 3,7\%$) inferiores a los rendimientos de los sistemas convencionales, una brecha de rendimiento menor que las estimadas anteriormente (Ponisio *et al.* 2015). Estos investigadores no encontraron diferencias significativas en los rendimientos de los cultivos con leguminosas versus sin leguminosas, perennes versus anuales y en países desarrollados o en vía de desarrollo. En cambio, encontraron que dos prácticas de diversificación agrícola tales como los cultivos múltiples y las rotaciones, en sistemas orgánicos reducían sustancialmente la brecha de rendimiento (de $9 \pm 4\%$ y $8 \pm 5\%$, respectivamente).

Una vez los agroecosistemas alcanzan la última etapa del proceso de conversión (rediseño del sistema) y el sistema diversificado es prevalente, la producción total aumenta a nivel de finca. Los mecanismos que se traducen en una mayor productividad en los sistemas diversificados, están integrados en el proceso de facilitación. La facilitación se produce cuando un cultivo modifica el entorno de una forma que favorece a un segundo cultivo, por ejemplo, reduciendo la población de una plaga crítica en el cultivo, o liberando nutrientes que pueden ser aprovechados por el segundo cultivo (Lithourgidis *et al.* 2011).

Estos mecanismos están relacionados con la menor incidencia de patógenos y plagas observados generalmente en cultivos diversificados y a la mayor eficiencia en el uso de los recursos por cultivos con diferentes sistemas de radicales y morfologías diferentes. La captación de recursos y la eficiencia de conversión de recursos son conceptos que también se han sugerido como mecanismos subyacentes a las ventajas del incremento en el rendimiento en los sistemas diversificados.

Una escuela de pensamiento sobre la utilización de los recursos en sistemas de cultivos intercalados afirma que la combinación de dos especies contrastantes, generalmente leguminosas/cereales, conduciría a un aumento general de la productividad biológica de cada especie cultivada por separado, ya que la mezcla puede utilizar los recursos de forma más eficiente que en los monocultivos (Vandermeer 1992). Huang *et al.* (2015) exploraron cómo los sistemas intercalados de maíz-haba, maíz-soya, maíz-garbanzo y maíz-nabo afectaban el rendimiento y la absorción de nutrientes en los campos agrícolas del noroeste de China. Los autores encontraron que los sistemas intercalados presentaron mayores rendimientos en casi todos los casos comparados con sus homólogos de monocultivos. Además, observaron que los sistemas intercalados eran más eficientes en remover el nitrógeno del suelo, lo que indica un aumento de la eficiencia en el uso de este recurso en los policultivos.

Zhang y Li (2003) proponen el “principio de producción por competencia-recuperación” basado en varios años de estudios de sistemas intercalados de cultivos temporada corta y larga. Ellos sugieren que las interacciones interespecíficas aumentan el crecimiento, la absorción de nutrientes y el rendimiento de las especies dominantes, pero disminuye el crecimiento y la absorción de nutrientes del cultivo subordinado durante la fase de coexistencia de las dos especies de cultivo. Después de que el cultivo dominante es cosechado, el cultivo subordinado tiene una recuperación, lo que al final se refleja en rendimientos estables o incluso mejores en comparación con los monocultivos correspondientes.

PRINCIPIOS AGROECOLÓGICOS PARA LA CONVERSIÓN

Como una ciencia aplicada, la agroecología utiliza los ya bien establecidos principios ecológicos para el diseño y el manejo de agroecosistemas diversificados donde los insumos externos son sustituidos por procesos naturales tales como la fertilidad natural de suelos, la alelopatía y el control biológico (Tabla 1). La agroecología no promueve recetas técnicas, sino principios, que cuando se aplican en una región particular, toman diferentes formas tecnológicas dependiendo de las necesidades socioeconómicas de los agricultores y sus circunstancias biofísicas (Altieri 1995, Gliessman 1998). Cada práctica está vinculada a uno o más principios, contribuyendo así a su manifestación en la función de los agroecosistemas (Tabla 2). Las prácticas aplicadas ponen en marcha las interacciones ecológicas que impulsan procesos claves para el funcionamiento del agroecosistema (ciclo de nutrientes, regulación de plagas, productividad, etc.) (Fig. 2).

La agroecología no consiste en promover soluciones como “balas mágicas” que están divorciados de los contextos locales y que pueden ser difundidas siguien-

Tabla 1. Principios agroecológicos para el diseño sistemas agrícolas biodiversos, conservadores de recursos, eficientes energética y resilientes (Altieri 1995; Gliessman, 1998).

1. Mejorar el reciclaje de biomasa , con el fin de optimizar la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes a través del tiempo
2. Fortalecer el “ sistema inmunológico “ de los sistemas agrícolas mediante el mejoramiento de la biodiversidad funcional (enemigos naturales, antagonistas, etc.), mediante la creación de hábitats adecuados.
3. Proporcionar las condiciones del suelo más favorables para el crecimiento de las plantas, en particular mediante la adición de materia orgánica y el aumento de la actividad biológica del suelo
4. Minimizar las pérdidas de energía, agua , nutrientes y recursos genéticos mediante el mejoramiento, conservación y regeneración de los recursos suelo y agua y biodiversidad agrícola
5. Diversificación de especies y de recursos genéticos en el agroecosistema a través del tiempo, espacio y paisaje
6. Aumentar las interacciones biológicas y las sinergias entre los componentes de la diversidad biológica agrícola , promoviendo así los procesos y servicios ecológicos claves

Tabla 2. Contribución relativa de varias prácticas de manejo a uno o más principios agroecológicos (Vázquez *et al.* 2012).

Prácticas de manejo	Principio al que contribuyen *					
	1	2	3	4	5	6
Aplicación de compost	X		x			
Cultivos de cobertura y / o abonos verdes	X	x	x	X	x	X
Mulching	X		x	X		
Rotación de cultivos	X		x	X	x	
Uso de insecticidas microbioanos y/o botánicos		x				
Uso de flores insectarias		x			x	X
Cercas vivas		x	x		x	X
Cultivos intercalados	X	x	x	x	x	X
Agroforestería	X	x	x	x	x	X
Integración animal	X		x	x	x	X

* Cada número se refiere a un principio agroecológico enumerado en la Tabla 1

**Figura 2.** Principios y procesos agroecológicos para la conversión de los sistemas agrícolas.

do el enfoque de arriba hacia abajo. La agroecología se basa en la calidad de las interacciones complejas que resultan de la combinación adecuada de diversas prácticas cuya puesta en funcionamiento en circunstancias particulares tendrán necesariamente que cambiar de acuerdo a cada contexto, ya que cada entorno tiene

sus propias características (Malezieux 2012). El conjunto de prácticas culturales utilizadas por cada agricultor resulta en diferencias funcionales que no pueden ser explicados por una sola práctica. Esto es lo que Andow y Hidaka (1989) han llamado “síndrome de producción”, definido como un conjunto de prácticas de manejo que son mutuamente adaptativas y conducen a un alto rendimiento. Sin embargo, subconjuntos de este conjunto de prácticas pueden ser sustancialmente menos adaptativa; es decir, la interacción entre prácticas conduce a mejorar el rendimiento del sistema que no pueden ser explicados por los efectos aditivos de prácticas individuales. Una de las frustraciones de la investigación en la brecha de rendimiento entre sistemas convencionales/ orgánicos, ha sido la incapacidad de prácticas de bajos insumos para superar las prácticas convencionales en comparaciones experimentales lado-a-lado, a pesar del éxito de muchos sistemas orgánicos y sistemas de producción de bajos insumos. Una brecha de rendimiento consistente es de 19-25% cuando se comparan sistemas agrícolas convencionales y orgánicos, pero curiosamente la brecha de rendimiento se reduce considerablemente cuando los agricultores orgánicos adoptan culti-

vos múltiples y rotaciones de cultivo complejas (Poniso *et al.* 2015).

Dependiendo de cómo se aplican ciertas prácticas y si se complementan o no con otras, una práctica particular a veces puede actuar como un “suiche ecológico” o “mesa de control ecológica” activando simultáneamente procesos claves tales como el reciclaje de nutrientes, control biológico, antagonismo, alelopatía, etc., todos esenciales para la salud y la productividad de un determinado sistema de cultivo. Los cultivos de cobertura, por ejemplo, pueden simultáneamente fomentar múltiples efectos, incluyendo supresión de malezas, enfermedades del suelo, plagas, conservar suelo, mejorar la estabilidad de agregados y activar la materia orgánica, fijar nitrógeno y extraer nutrientes (Altieri 1995).

Evidentemente, cada sistema de producción representa un grupo distinto de prácticas de manejo y, en consecuencia, de relaciones ecológicas. Esto subraya el hecho de que los **diseños agroecológicos** son específicos de sitio y lo que pueden aplicarse en otros lugares no son las técnicas, sino los **principios ecológicos** que subyacen a la sostenibilidad. Transferir tecnologías de un sitio a otro es inútil, si el conjunto de las interacciones ecológicas asociadas con esas técnicas no se pueden replicar.

INTERACCIONES AGROECOLÓGICAS EN SISTEMAS AGRÍCOLAS REDISEÑADOS

El rediseño del sistema de producción es la última etapa en el proceso de conversión agroecológica y consiste en pasos prácticos para romper el monocultivo y reducir así su vulnerabilidad ecológica, mediante el restablecimiento de la biodiversidad agrícola a nivel de campo y de paisaje.

La promoción de la biodiversidad dentro de los sistemas agrícolas es la piedra angular de la estrategia del rediseño de los sistemas, ya que a medida que se incrementa la diversidad de los grupos funcionales se promueven los procesos claves (regulación de plagas, reciclaje de nutrientes, etc.) fundamentales para la función del agroecosistema (Moonen y Barberi 2008). Mayor diversidad dentro de los sistemas de cultivo conduce a una mayor diversidad en la biota asociada. El aumento de la biodiversidad también conduce a un mayor control de plagas y una polinización más efectiva así como un ciclo de nutrientes más cerrado (Altieri y Nicholls 2012)

Regulación de plagas

En los últimos 40 años, muchos estudios han evaluado los efectos de la diversidad de cultivos en las densidades de herbívoros plagas. Un revisión realizada por Risch *et al.* 1983) resumen 150 estudios publicados sobre el efecto de la diversificación de cultivos en la abundancia plagas de insectos herbívoros; 198 espe-

cies de herbívoros en total fueron examinados en estos estudios. Cincuenta y tres por ciento de estas especies resultaron ser menos abundantes en los sistemas más diversificados, 18% eran más abundantes en los sistemas diversificados, el 9% no mostraron ninguna diferencia, y el 20% mostró una respuesta variable. Ocho años más tarde, Andow (1991) analizó los resultados de 209 estudios en los que se incluyen 287 especies plagas, y encontró que, en comparación con los monocultivos, la población de insectos plaga fue inferior en un 52% de los estudios, y superior solo en un 15% de los estudios. De las 149 especies de plagas con poblaciones inferiores reportadas en sistemas diversificados, 60% eran monófagos, y el 28% polífagos. La población de enemigos naturales de plagas fue mayor en los cultivos intercalados en un 53% de los estudios e inferior en un 9%. La reducción en el número de plagas de insectos monófagos fue casi el doble (53,5% de los estudios de caso mostraron bajos números en policultivos) que para los insectos polífagos (33,3% de los estudios de caso).

En un meta-análisis de 21 estudios que comparan la supresión de plagas en policultivos versus monocultivos, Tonhasca y Byrne (1994) encontraron que en policultivos se redujeron significativamente la densidad de plagas en un 64%. En un meta-análisis posterior Letourneau *et al.* (2011) encontraron un aumento de 44% en la abundancia de enemigos naturales (148 comparaciones), un incremento de 54% en la mortalidad de herbívoros, y un 23% de reducción de daño al cultivo en fincas diversificadas que en sistemas de monocultivo. Inequívocamente, revisiones anteriores y meta-análisis recientes sugieren que los esquemas de diversificación de los sistemas productivos, generalmente logran resultados positivos en el manejo de plagas de insectos, reflejados en el incremento de enemigos naturales, la reducción de la abundancia de herbívoros plaga, y la reducción de daños a los cultivos.

Los fitopatólogos también han observado que los sistemas de cultivos mixtos pueden disminuir la incidencia de patógenos por la desaceleración de la tasa de desarrollo de las enfermedades y por modificar las condiciones ambientales a fin de que sean menos favorables para la propagación de determinados agentes patógenos (Boudreau 2013). Para las enfermedades del suelo y las dispersas por las gotas de agua, Hiddink *et al.* (2010) encontraron que sistemas de cultivo mixto (incluyendo cultivos en franjas, cultivos intercalados, y cultivos con alta diversidad genética) redujeron las enfermedades en un 74,5% de los casos en comparación con los sistemas de monocultivo (19,6% neutro; 5,9% negativo; en un escrutinio de 36 estudios con 51 comparaciones). La dilución de hospedero fue propuesto como mecanismo clave para reducir la incidencia de enfermedades del suelo y las dispersas por las gotas de agua. Otros mecanismos, tales como la alelopatía y el antagonismo microbiano, se proponen como estrategias que afectan la

severidad de enfermedades en los sistemas agrícolas diversificados (Stone *et al.* 2004). Estos efectos conducen a menor daño a los cultivos y contribuyen al aumento de rendimientos de los cultivos mixtos, en comparación con los monocultivos correspondientes.

Los ecólogos de malezas postulan que muchos sistemas diversificados, son a menudo mejores en la supresión de malezas que los monocultivos ya que las combinaciones de cultivos intercalados pueden explotar mejor los recursos que los monocultivos, suprimiendo así de forma más eficaz, el crecimiento de las malezas por un mejor uso preventivo de los recursos (Poggio 2005). Alternativamente, los cultivos intercalados pueden presentar ventajas en el rendimiento frente a los monocultivos, sin ser superiores en la supresión del crecimiento de malezas. Esta última situación se plantearía si el cultivo intercalado de mayor rendimiento resulta de (1) una mejor utilización de los recursos, por lo que la competencia entre cultivos y malezas no existen; o (2) aumentar la eficiencia de la conversión de recursos, cambios en la partición de biomasa de los cultivos, modificación de micro hábitats, y la reducción de las presiones de plagas, ninguno de los cuales resultaría de la usurpación de recursos adicionales de las malezas (Liebman y Dyck 1993).

La estabilidad del rendimiento en medio de la variabilidad climática

Una razón importante por lo que los sistemas intercalados son populares entre los pequeños agricultores del mundo en desarrollo, es por que son más estables que los monocultivos, permitiendo a los agricultores producir cultivos diferentes simultáneamente, al tiempo que minimizan los riesgos (Horwith 1985). Los datos de 94 experimentos en cultivos mixtos sorgo/guandul mostraron que para un determinado nivel de 'desastre', el monocultivo de guandul fracasaría un año en 5, el monocultivo de sorgo fracasaría un año de ocho, pero el policultivo fracasaría sólo un año en 36 (Willey 1979).

Los policultivos exhiben mayor estabilidad en el rendimiento y la productividad permanece constante durante una sequía comparado con los monocultivos. Natarajan y Willey (1996), examinaron los efectos de la sequía en los rendimientos de variedades mejoradas de sorgo, maní y mijo y en policultivos de sorgo y maní, mijo y maní y sorgo y mijo manipulando el estrés hídrico. Todos los policultivos sobre-rindieron constantemente con cinco niveles de disponibilidad de humedad, que van desde 297 a 584 mm de agua aplicada durante la temporada de cultivo. Lo más interesante fue que la tasa de rendimiento aumento con estrés hídrico, de tal manera que las diferencias en la productividad relativa entre los monocultivos y policultivos se acentuó cuando el estrés era mayor (Natarajan y Willey 1996).

Un posible mecanismo para explicar las observaciones anteriores es que los policultivos tienden a tener

mayores niveles de contenido de materia orgánica del suelo (Marriott y Wander 2006), lo que a su vez aumenta la capacidad de retención de humedad del suelo, y por lo tanto conduce a una mayor disponibilidad de agua para las plantas, lo que influye positivamente en la capacidad y la resistencia de los cultivos a las condiciones de sequía (Weil y Magdoff 2004, Liu *et al.* 2007). Hudson (1994) demostró que cuando el contenido de materia orgánica del suelo aumenta del 0,5 al 3%, la capacidad de agua disponible se duplica. En ensayos a largo plazo para medir la capacidad relativa de retención de agua de los suelos, se observó que los sistemas agrícolas diversificados, presentaron una clara ventaja sobre los sistemas de monocultivo convencionales. En el noreste de Estados Unidos, entre 1984 y 1998 se produjo una sequía de cinco años, y en cuatro de ellos el maíz orgánico diversificado produjo más que el maíz convencional por márgenes importantes. El maíz orgánico produjo entre un 38% y un 137% en relación con el maíz convencional. El principal mecanismo que explica el mayor rendimiento de los sistemas de maíz orgánico fue la mayor capacidad de retención de agua del suelo en los tratamientos. Los suelos de las parcelas orgánicas capturan más agua y retienen más de ella en la zona radicular que en sistemas convencionales (Lotter 2003). En un ensayo de más de 37 años comparando sistemas orgánicos y convencionales, Reganold (1995) encontró niveles significativamente más altos de materia orgánica de los suelos y un 42% mayor contenido de humedad en parcelas manejadas orgánicamente que en parcelas convencionales.

Muchos sistemas diversificados también mejoran la eficiencia del uso del agua en comparación con los monocultivos. En China, la eficiencia del uso del agua en sistemas intercalados de papa-frijol fue un 13,5% mayor que en el monocultivo (10.15 kg/m³) (Malezieux 2012). Morris y Garrity (1993) encontraron que la eficiencia en la utilización de agua por el cultivo intercalado, sobrepasa considerablemente la eficiencia en la utilización de agua por monocultivos, a menudo, en más del 18% y hasta en un 99%. Lo hacen mediante el uso más eficiente del total de agua en el suelo por las raíces de la planta, al aumentar el almacenamiento de agua en la zona de raíces, y al reducir la evaporación entre hileras, pero también mediante el control de la transpiración excesiva, y mediante la creación de un microclima especial que favorece el crecimiento y desarrollo de las plantas.

En condiciones de laderas propensas a tormentas tropicales, los sistemas intercalados pueden proporcionar protección contra la erosión del suelo, ya que su arquitectura vegetal permite una mejor cobertura del suelo. Bajo lluvias torrenciales los sistemas más complejos y diversificados, protegen el suelo contra la erosión, ya que reducen el impacto de las gotas de lluvia y reducen la velocidad del agua por la cobertura del suelo, lo que permite mejorar la infiltración del agua y concentrar la humedad. No sólo la diversidad arriba del

suelo proporcionan protección al suelo, sino también el sistema radicular ayuda a estabilizar el suelo infiltrando agua en el perfil y manteniéndola almacenada en los espacios porosos (Altieri *et al.* 2015). Un estudio realizado en Elora, Ontario por Wall *et al.* (1991) donde se evaluó un cultivo intercalado con trébol rojo, encontraron que el trébol intercalado con maíz tiene una alta capacidad para proporcionar protección contra la erosión del suelo y además presenta efectos positivos sobre los rendimientos de maíz para ensilaje. La pérdida de suelo fue significativamente menor en el maíz intercalado con trébol rojo que en sistema de monocultivos. En el sistema de maíz/trébol el escurrimiento varió de 45 a 87% y la reducción en la pérdida de suelo fue de 46 a 78%.

Los vínculos entre la fertilidad del suelo y la incidencia de la plaga de insectos

Aunque las estrategias de diversificación de cultivos en forma de rotaciones de múltiples especies, cultivos de cobertura, agroforestería, policultivos y cultivos intercalados son clave en el proceso de conversión, cuando estas se complementan con aplicaciones regulares de enmiendas orgánicas (residuos de cosecha, estiércoles animales y compost) se observan sorprendentes efectos sobre la sanidad vegetal, la calidad del suelo y la productividad. Estas conexiones ocultas han sido totalmente ignoradas por los entomólogos y otros investigadores agrícolas que han explicado los brotes de plagas en los sistemas de cultivo sólo como una consecuencia de la ausencia de enemigos naturales o por los efectos de los insecticidas como el desarrollo de la resistencia a los plaguicidas por insectos o brotes de plagas secundarias debido a alteraciones del control biológico (Altieri *et al.* 2012). Los científicos occidentales en gran medida desconocen la teoría de *trophobiosis* ofrecida por el científico francés Chaboussou (2004), quien ya en 1967 afirmó que los problemas de plagas también estaban vinculados a las alteraciones en los equilibrios nutricionales de las plantas de cultivo y a la destrucción de la vida en el suelo. El explicó que las aplicaciones de nitrógeno soluble (N) en forma de abonos químicos (y también de ciertos pesticidas) aumentan los volúmenes de N celular, amoníaco y aminoácidos, más rápido que la velocidad a la cual las plantas pueden sintetizar proteínas. Estas reducciones en la tasa de síntesis de proteínas resultan en una acumulación temporal de N libre, azúcares solubles y aminoácidos en el follaje, sustancias necesarias para el crecimiento y la reproducción de insectos herbívoros y patógenos de plantas. La evidencia empírica de Chaboussou, lo llevó a postular que las plagas de insectos y enfermedades, crecen y se multiplican más rápidamente cuando las plantas contienen más nutrientes solubles libres debido a la inhibición de la síntesis de proteínas. Creía también que un suelo saludable, era fundamental para el equilibrio en la absorción de nutrientes minerales por la planta, especialmen-

te micronutrientes. La falta de micronutrientes también provoca la inhibición en la síntesis de proteínas y, por lo tanto, conduce a una acumulación de nutrientes que utilizan las plagas y los patógenos (Chaboussou 2004).

En los últimos 20 años, una serie de estudios de investigación han surgido, corroborando las afirmaciones de Chaboussou, que la habilidad de un cultivo para resistir o tolerar plagas de insectos y enfermedades está vinculado a las propiedades óptimas físicas, químicas y principalmente biológicas de los suelos. Suelos con alta materia orgánica y una alta actividad biológica, por lo general exhiben buena fertilidad del suelo así como una gran complejidad de cadenas tróficas y organismos benéficos que previenen la infección (Altieri y Nicholls 2003). En experimentos bajo invernadero que comparaba maíz cultivado en suelos orgánicos con maíz cultivado en suelo fertilizado con químicos, se observó que cuando se liberaban hembras grávidas del barrenador del tallo del maíz *Ostrinia nubilalis* para que ovipositaran, estas colocaban más huevos en plantas sobre suelos fertilizados químicamente que en plantas cultivadas en suelo orgánico (Phelan *et al.* 1995). Se observó alta variación en oviposición cuando el maíz crecía en recipientes con suelos recolectados de fincas manejadas convencionalmente. En contraste, la postura de huevos fue uniformemente baja en plantas que crecían en recipientes con suelos recolectados de fincas bajo manejo orgánico. Los resultados obtenidos en las fincas mostraron que la postura de huevos fue aproximadamente 18 veces mayor en las plantas bajo suelo manejado convencionalmente que en plantas bajo un régimen orgánico. Los autores sugieren que esta diferencia es una evidencia de una característica biológica amortiguante que se manifiesta más comúnmente en suelos manejados orgánicamente. En estudios similares realizados en China por Hsu *et al.* (2009) indican que mariposas de *Pieris rapae crucivora* prefieren poner huevos en el follaje de plantas de col fertilizadas químicamente y también las larvas crecieron más rápidamente en estas plantas. Los resultados de este estudio indican que un tratamiento orgánico adecuado puede aumentar la producción de biomasa producida por la planta al presentar una menor incidencia de plagas.

Esta reducción de susceptibilidad de las plantas a enfermedades y plagas motivó a Phelan *et al.* (1995) para proponer el concepto de *amortiguación biológica*, que afirma que un suelo con una comunidad biológica más compleja apoyado por el incremento de materia orgánica activa tiende a moderar las fluctuaciones en el ambiente del suelo y a proporcionar una mayor estabilidad ecológica. Durante el proceso de conversión, los mecanismos adicionales que transfieren esta estabilidad del suelo a través de una mayor resistencia de la planta pueden incluir (a) modulación de la planta para la disponibilidad de nutrientes minerales en el suelo a través de las cadenas tróficas, y/o (b) un incremento en la defensa

sistémica inducida en plantas por organismos benéficos que interactúan con las raíces de las plantas (Phelan *et al.* 1995).

CONCLUSIONES

Un principio agroecológico clave aplicado desde el inicio del proceso de conversión, es la diversificación del agroecosistema, mediante la adición de diferentes componentes regenerativos tales como la combinación de plantas en arreglos de cultivos intercalados, cultivos y árboles en sistemas agroforestales, animales y árboles en los sistemas silvopastoriles, utilizando leguminosas como cultivos de cobertura o en las rotaciones, etc. Una comunidad de organismos en un agroecosistema se torna más compleja cuando se incorpora un gran número de diferentes tipos de plantas, lo que conduce a una mayor interacción entre artrópodos y microorganismos, componentes de la biodiversidad arriba y abajo del suelo, promoviendo así los procesos ecológicos que dan estabilidad al sistema agrícola. Cuando la biodiversidad aumenta, también lo hacen los organismos benéficos ya que se dan las oportunidades para su coexistencia y la interferencia benéfica entre las especies puede mejorar la sostenibilidad del agroecosistema (van Emden y Williams 1974). Sistemas diversos promueven redes tróficas complejas, que implican más conexiones e interacciones posibles entre los miembros, creando muchas rutas alternativas para el flujo de energía y materia. Por esta razón, una comunidad más compleja exhibe una producción más estable y es menos vulnerable a plagas y microorganismos indeseables (Power y Flecker 1996). Mediante el incremento de la biodiversidad funcional, se logra un objetivo importante del proceso de conversión, que es el fortalecimiento de los procesos ecológicos de los agroecosistemas, permitiendo a los agricultores eliminar gradualmente los insumos y depender así de las las funciones ecológicas del ecosistema (Vázquez *et al.* 2012).

La integridad de un agroecosistema en vías de reconversión se basa en las sinergias entre la diversidad vegetal y la comunidad microbiana del suelo, y su relación con la materia orgánica. Suelos con alto contenido de materia orgánica y una alta actividad biológica por lo general exhiben una buena fertilidad del suelo, así como una alta complejidad de las cadenas tróficas y la presencia de muchos organismos benéficos que previenen la incidencia e infección de patógenos y plagas (Phelan 2009). Se puede argumentar que los agroecosistemas cuyos ciclos de nutrientes son predominantemente modulados por la red trófica del suelo, poseen mayor estabilidad ecológica, así como mayor resiliencia y resistencia a la perturbación (Altieri *et al.* 2015). Por consiguiente, el manejo debe estar orientado a mejorar la capacidad de las plantas de cultivo para resistir o tolerar plagas y enfermedades mediante la manipulación

de las propiedades biológicas de los suelos y la creación de una infraestructura vegetal que alberga enemigos naturales de plagas, así como polinizadores. El incremento de las interacciones ecológicas positivas arriba y abajo del suelo mediante prácticas de manejo de suelo y salud del cultivo, constituye un camino sólido y sostenible para optimizar la función del agroecosistema.

Basar el proceso de conversión en prácticas particulares tiende a enfocarse sobre los componentes en forma aislada, centrándose en la optimización de un componente (la fertilidad del suelo, la nutrición de las plantas, el crecimiento de los cultivos, etc.) dejando de explotar las propiedades que emergen a través de la interacción de los diversos componentes de la finca. La sustitución de insumos se convierte así, principalmente en una herramienta reactiva, concentrando los esfuerzos para resolver problemas a medida que surgen, aliviando síntomas en lugar de descubrir las causas principales de porque ocurren los problemas. Los agroecólogos consideran los problemas de plagas o deficiencias de nutrientes como un síntoma del mal funcionamiento de un proceso ecológico (control biológico o el ciclo de nutrientes) y, por lo tanto, el esfuerzo se centra en descubrir las raíces de tales desequilibrios. En lugar de centrarse en un componente particular del agroecosistema, la agroecología enfatiza la interrelación de todos los componentes del agroecosistema y la dinámica compleja de los procesos ecológicos.

Así, la agroecología es un enfoque alternativo que va más allá del uso de insumos para el desarrollo integrado de los agroecosistemas con mínima dependencia externa en particular de insumos agrícolas. El énfasis está en el diseño de sistemas agrícolas complejos en los que las interacciones ecológicas y sinergias entre los componentes biológicos sustituyen los insumos para proporcionar los mecanismos que patrocinan la fertilidad del suelo, la productividad y la protección de los cultivos (Altieri 1995, Gliessman 1998).

REFERENCIAS

- Altieri MA. 1995. *Agroecology: the science of sustainable agriculture*. Boulder: Westview Press.
- Altieri MA. 2002a. *Agroecological principles and strategies for sustainable agriculture*. En *Agroecological Innovations: Increasing Food Production with Participatory Development* (Uphoff NT, ed). London: Earthscan publication Ltd, pp. 40–46.
- Altieri MA. 2002b. *Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments*. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93: 1–24.
- Altieri MA, Nicholls CI. 2003. *Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems*. *Soil Till Res* 72: 203–211.

- Altieri MA, Nicholls CI. 2004. Biodiversity and pest management in agroecosystems. Binghamton, New York, USA: The Harworth Press.
- Altieri MA, Nicholls CI. 2012. Agroecology: scaling up for food sovereignty and resiliency. *Sustainable Agriculture Reviews* 11: 1-29.
- Altieri MA, Ponti L, Nicholls CI. 2012. Soil Fertility, Biodiversity and Pest Management. En *Biodiversity and Insect Pests: Key Issues for Sustainable Management* (Gurr GM, Wratten SD, Snyder WE, Read DMY, eds). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Altieri MA, Nicholls CI, Henao A, Lana MA. 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 869-890.
- Andow DA, Hidaka K. 1989. Experimental natural history of sustainable agriculture: syndromes of production. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 27: 447-462.
- Andow D. 1991. Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual Review of Entomology* 36: 561-586.
- Boudreau MA. 2013. Diseases in intercropping systems. *Annu Rev Phytopathol* 51: 499-519.
- Chaboussou F. 2004. *Healthy crops: a new agricultural revolution*. Oxford, England: Jon Carpenter Publishing.
- De Schutter O. 2010. Report submitted by the Special Rapporteur on the right to food. UN General Assembly, Human Rights Council. Sixteenth Session, Agenda item 3 A/HRC/ 16/49.
- Folke C. 2006. Resilience: the emergence of a perspective for social ecological systems analyses. *Glob Environ Chang* 16: 253-267.
- Gliessman SR. 1998. *Agroecology: ecological process in sustainable agriculture*. Michigan: Ann Arbor Press.
- Gliessman SR. 2010. *Agroecology: The ecology of sustainable food systems*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Heinemann JA, Massaro M, Coray DS, Agapito-Tenfen SZ, Wen JD. 2013. Sustainability and innovation in staple crop production in the US Midwest. *International Journal of Agricultural Sustainability* 12 (1): 71-88.
- Hiddink GA, Termorshuizen, AJ, Bruggen AHC. 2010. Mixed cropping and suppression of soilborne diseases. En *Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming* (Lichtfouse E, ed). *Sustainable Agriculture Reviews* 4: 119-146.
- Horwith B. 1985. A role for intercropping in modern agriculture. *Biological Science* 35 (5): 286-291.
- Hsu YT, Shen TC, Hwang SY. 2009. Soil fertility management and pest responses: a comparison of organic and synthetic fertilization. *Journal of Economic Entomology* 102: 160-169.
- Huang C, Liu Q, Heerink N, Stomph T, Li B, Liu R, *et al.* 2015. Economic Performance and Sustainability of a Novel Intercropping System on the North China Plain. *PLoS ONE* 10(8): e0135518. doi:10.1371/journal.pone.0135518.
- Hudson B. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation* 49 (2): 189-194.
- Kremen C, Miles A. 2012. Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecology and Society* 17: (4)1-40.
- Lamine C, Bellon S. 2009. Conversion to organic farming: a multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social sciences. *A review Agron Sustain Dev* 29: 97-112.
- Landis DA, Gardiner MM, van der Werf W, Swinton SM. 2008. Increasing corn for biofuel production reduces biocontrol services in agricultural landscapes. *PNAS* 105: 20552-20557. doi:10.1073/pas.0804951106.
- Letourneau DK, Armbrrecht I, Salguero Rivera B, Montoya Lerma J, Jimenez Carmona E, Constanza Daza M, Escobar S, Galindo V, Gutierrez C, Duque Lopez S, Lopez Mejia J, Acosta Rangel A, Herrera Rangel J, Rivera L, Arturo Saavedra C, Torres AM, Reyes Trujillo A. 2011. Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecological Applications* 21(1): 9-21.
- Li L, Li M, Sun H, Zhou LL, Bao XG, Zhang HG, Zhang FS. 2007. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorous-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 11192-11196.
- Liebman M, Dyck E. 1993. Crop Rotation and Intercropping Strategies for Weed Management. *Ecological Applications* 3 (1): 92-122.
- Lithourgidis AS, Dordas CA, Damalas CA, Vlachostergios DN, 2011. Annual Intercrops: An Alternative Pathway for Sustainable Agriculture. *Australian Journal of Crop Science* 5: 396-410.
- Liu B, Tu C, Hu S, Gumpertz M, Ristaino JB. 2007. Effect of organic, sustainable, and conventional management strategies in grower fields on soil physical, chemical, and biological factors and the incidence of Southern blight. *Applied Soil Ecology* 37(3): 202-214.
- Lotter DW. 2003. Organic agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 21: 37-51.
- Mader P, Fliessbach A, Dubois D, Gunst L, Fried P, und Niggli U. 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296: 1694-1697.
- Malezieux E. 2012. Designing cropping systems from nature. *Agron Sustain Dev* 32: 15-29.
- Marriott EE, Wander MM. 2006. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farm-

- ing systems. *Soil Science Society of America Journal* 70 (3): 950-959.
- Mc Rae RJ, Hill SB, Mehuys FR, Henning J. 1990. Farm scale agronomic and economic conversion from conventional to sustainable agriculture. *Advances in Agronomy* 43:155-198.
- Moonen AC, Barberi P. 2008. Functional biodiversity: An agroecosystem approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 127:7-21.
- Morris RA, Garrity DP. 1993. Resource capture and utilization in intercropping: water. *Field Crops Research* 34: 303-317.
- Natarajan M, Willey RW. 1996. The effects of water stress on yields advantages of intercropping systems. *Field Crop Res* 13: 117-131.
- Pimentel D, Hepperly P, Hanson J, Douds D, Seidel R. 2005. Environmental, energetic and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *Bioscience* 55: 573-582.
- Phelan PL, Mason JF, Stinner BR. 1995. Soil-fertility management and host preference by European corn borer, *Ostrinia nubilalis* (Hübner), on *Zea mays* L.: a comparison of organic and conventional chemical farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 56: 1-8.
- Phelan PL. 2009. Ecology-based agriculture and the next green revolution: Is modern agriculture exempt from the laws of ecology? En *Sustainable agroecosystem management: Integrating ecology, economics, and society* (Bohlen PJ, House G, eds). Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 97-135.
- Poggio SL. 2005. Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109: 48-58.
- Ponisio LC, M'Gonigle LK, Mace KC, Palomino J, de Valpine P, Kremen C. 2015. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proc R Soc B* 282: 20141396.
- Power AG, Flecker AS. 1996. The role of biodiversity in tropical managed ecosystems. En *Biodiversity and Ecosystem Processes in Tropical Forests* (Orians GH, Dirzo R, Cushman JH, eds). New York: Springer-Verlag, pp 173-194.
- Reganold JP. 1995. Soil quality and profitability of biodynamic and conventional farming systems: a review. *American Journal of Alternative Agriculture* 10: 36-46.
- Risch SJ, Andow D, Altieri MA. 1983. Agroecosystem diversity and pest control: data, tentative conclusions, and new research directions. *Environmental Entomology* 12: 625-629.
- Rosenzweig C, Hillel D. 2008. *Climate change and the global harvest: impacts of El Niño and other oscillations on agroecosystems*. New York: Oxford University Press.
- Rosset PM, Altieri MA. 1996. Agroecology versus input substitution: a fundamental contradiction of sustainable agriculture. *Society & Natural Resources: An International Journal* 10: 283-295.
- Stone A, Scheuerell S, Darby H, Magdoff F, Ray R. 2004. Suppression of soilborne diseases in field agricultural systems: organic matter management, cover cropping, and other cultural practices. En *Soil organic matter in sustainable agricultura* (Magdoff F, Weil RR, eds). Boca Raton, FL: CRC Press, pp 131-177.
- Thiessen Martens JR, Entz MH, Wonneck MD. 2015. Review: Redesigning Canadian prairie cropping systems for profitability, sustainability, and resilience. *Can J Plant Sci* 95: 1049-1072.
- Timmermann C, Felix G. 2015. Agroecology as a vehicle for contributive justice. *Agriculture and Human Values*. Doi: 10.1007/s10460-014-9581-8.
- Tonhasca A, Byrne DN. 1994. The effects of crop diversification on herbivorous insects: a meta-analysis approach. *Ecological Entomology* 19(3): 239-244.
- van Emden HF, Williams GF. 1974. Insect stability and diversity in agroecosystems. *Annual Review of Entomology* 19: 455-475.
- Vandermeer J. 1992. *The ecology of intercropping*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Vandermeer J, Van Noordwijk M, Anderson J, Ong C, Perfecto I. 1998. Global change and multi-species ecosystems: concepts and issues. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 67:1-22.
- Vázquez LL, Matienzo Brito Y, Simonetti JA, Veitia Rubio M, Paredes ER, Fernandez EG. 2012. Contribucion al diseno agroecologico de sistemas de produccion urbanos y suburbanos para favorecer procesos ecologicos. *Agricultura Organica (Cuba)*: 18: 14-19.
- Wall GJ, Pringle EA, Sheard RW. 1991. Intercropping red clover with silage corn for soil erosion control. *Can J Soil Sci* 71: 137-145 A.
- Weil RR, Magdoff F. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. En *Soil organic matter in sustainable agricultura* (Magdoff F, Weil RR, eds). Boca Raton, FL: CRC Press, pp 1-42.
- Willey RW. 1979. Intercropping – its importance and its research needs. I. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstracts* 32: 1-10.
- Zhang F, Li L. 2003. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and Soil* 248: 305-312.
- Zhao ZH, Hui C, He DH, Li BL. 2015. Effects of agricultural intensification on ability of natural enemies to control aphids. *Sci. Rep.* 5: 8024. Doi:10.1038/srep08024.