

**Impacto de las prácticas agroecológicas sobre la
conservación, incremento o interacción de
servicios ecosistémicos en suelos agrícolas:
Revisión de Literatura**

Evelyn Matilde Bolaños Sigcho

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2020

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Impacto de las prácticas agroecológicas sobre la conservación, incremento o interacción de servicios ecosistémicos en suelos agrícolas: Revisión de Literatura

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Evelyn Matilde Bolaños Sigcho

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2020

Impacto de las prácticas agroecológicas sobre la conservación, incremento o interacción de servicios ecosistémicos en suelos agrícolas: Revisión de Literatura

Evelyn Matilde Bolaños Sigcho

Resumen. La intensificación agrícola ocasiona impactos negativos que alteran el equilibrio ecológico y la pérdida en la provisión de servicios ecosistémicos (SE). No obstante, los sistemas agroecológicos suponen una alternativa de restauración e incremento de estos en agroecosistemas multifuncionales. El objetivo central de esta revisión fue determinar el efecto de las prácticas agroecológicas (PA) sobre la conservación, incremento o interacción de SE de regulación y mantenimiento en suelos agrícolas. A través de una revisión sistemática de investigaciones publicadas por la comunidad científica en esta área se consideró y describió la interacción entre las PA y los SE de interés. El análisis de tendencias, enfoques y aplicaciones determinó que, PA como la rotación de cultivos, la labranza mínima o cero, la aplicación de enmiendas orgánicas, el manejo de residuos y los cultivos de cobertura incrementan la fertilidad y calidad del suelo, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y fortalece la dinámica de microorganismos que favorece al control biológico. Por tanto, una mejor comprensión en contextos locales permite la planificación e implementación de acciones que determinen mayores interacciones entre los procesos ambientales y las funciones ecológicas en los suelos agrícolas, para la provisión de múltiples SE de regulación y mantenimiento. También, se considera que a pesar del avance de la investigación es necesario progresar y profundizar en el conocimiento de relaciones de interacción poco conocidas entre las múltiples funciones y la complejidad de las PA para proveer SE, particularmente en contextos agrícolas donde en la actualidad se buscan procesos de cambio.

Palabras clave: Agroecosistemas, calidad del suelo, control biológico, fertilidad, gases de efecto invernadero.

Abstract. Agricultural intensification causes negative impacts that alter the ecological balance and reduce ecosystem services (ES). However, agroecological systems represent an alternative for the restoration and increase of these in multifunctional agroecosystems. The main objective of this review was to determine the effect of agroecological practices (AP) on the conservation, increase, or interaction of regulating and supporting ES in agricultural soils. This analysis of trends, approaches, and applications determined that PA such as crop rotation, minimum or zero tillage, application of organic amendments, residue management, and cover crops increase soil fertility and quality, reduce greenhouse gas emissions, and strengthen the dynamics of microorganisms that favor biological control. Therefore, a better understanding of local contexts allows the planning and implementation of actions that foster environmental processes and ecological functions in agricultural soils. Despite progress in these areas, it is necessary to deepen knowledge of interaction relationships between the complex and multiple functions of AP to provide ES, particularly in agricultural contexts where processes of change are currently sought.

Key words: Agroecosystems, biological control, fertility, greenhouse gases, soil quality.

ÍNDICE GENERAL

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen.....	iii
Índice General	iiiv
Índice de Cuadro y Figuras.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	4
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	5
4. CONCLUSIONES.....	24
5. LITERATURA CITADA.....	25

ÍNDICE DE CUADRO Y FIGURAS

Cuadro	Página
1. Enfoque en cultivos, duración, área geográfica, prácticas agroecológicas y SE de regulación y mantenimiento de los estudios revisados.	7

Figuras	Página
1. Reporte de estudios sobre el impacto de prácticas agroecológicas sobre SE en “Science Direct” y “Springer Link”.	5
2. Estudios reportados del impacto de las prácticas agroecológicas sobre los SE de regulación y mantenimiento.	6
3. Estudios reportados sobre el impacto de PA sobre los SE de regulación y mantenimiento provistos por el suelo.	14

1. INTRODUCCIÓN

El aumento proyectado de la población mundial constituye un llamado de atención por la demanda mundial de alimentos (Fukase y Martin, 2020), que determina también, la intensificación de la producción agrícola. Desde la revolución verde este sector intensificó su manejo, mediante la combinación de inversión en investigación de cultivos, expansión agrícola, mecanización y uso masivo de fertilizantes sintéticos, pesticidas y variedades de cultivos de alto rendimiento (Armanda, Guineé y Tukker, 2019; Pingali, 2012). Sin embargo, su desarrollo sucede a expensas del aumento de los impactos negativos sobre diferentes compartimentos ambientales. Los efectos negativos, como la degradación de suelos, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, el agotamiento de los recursos y la pérdida de biodiversidad surgen del manejo antrópico intensivo (Bommarco, Kleijn y Potts, 2013). En general, la transformación de hábitats naturales a sistemas agrícolas afecta los flujos metabólicos y provoca desequilibrios ecológicos en el entorno (Lind, Hasselquist y Laudon, 2019). Además, deteriora su resiliencia y disminuye la capacidad de proveer múltiples servicios ecosistémicos (SE). Por ejemplo, los suelos agrícolas actualmente afectados por la erosión disminuyen su potencial para el almacenamiento de carbono, presentan una estructura deficiente para el buen funcionamiento y soporte de las plantas, tienen efectos sobre la pérdida de biodiversidad funcional (Panagos et al., 2015). Así mismo, la erosión afecta sobre los bienes que la sociedad recibe de los múltiples SE que estos proveen.

Los SE son las características, funciones o procesos ecológicos que directa o indirectamente contribuyen al bienestar humano, los beneficios que los humanos reciben del funcionamiento de los ecosistemas (Costanza et al., 1997; Millennium Ecosystem Assessment [MEA], 2005). Estos se clasifican en servicios de aprovisionamiento, regulación y hábitat, soporte y hábitat y culturales acorde con Costanza et al. (1997). En la actualidad, la Clasificación Internacional Común de Servicios de los Ecosistemas (CICES) (2012), los conceptualiza como los resultados ecológicos que se originan de las funciones de los ecosistemas y que la sociedad disfruta para su bienestar. A partir de este enfoque, su clasificación es resumida en tres grupos; aprovisionamiento, cultural, regulación y mantenimiento (Haines y Potschin, 2018). Basado en estas clasificaciones, los SE ligados a los procesos y funciones del suelo, se consideran bienes globales, por tanto, están en la categoría de regulación y mantenimiento. Son determinados por la interrelación entre los factores ambientales y los sistemas biológicos que resultan en procesos ambientales y generan funciones dentro de los ecosistemas. Dentro de los más importantes beneficios a la humanidad se encuentra, el hábitat para los organismos del suelo, filtrado y almacenamiento en buffer, contribución a la regulación del microclima, potencial del secuestro de carbono, suministro de alimento, filtración y almacenamiento de agua, apoyo a las infraestructuras humanas (Calzolari et al., 2016) y control de erosión. Aunque, los beneficios que el recurso suelo y sus interacciones ofrecen a la sociedad son diversos, estos han experimentado una disminución global o tendencias insostenibles (MEA, 2005), debido a las actividades antrópicas.

La intensificación y el uso competitivo de suelos para cultivos, silvicultura y pastizales suponen un problema en la disponibilidad y prestación de SE (Drobnik, Greiner, Keller y Grêt-Regamey, 2018), pero un manejo apropiado puede mitigar estas acciones. Las prácticas convencionales inducen diservicios, mientras que las prácticas de conservación pueden mantener y mejorar la

provisión de SE desde el suelo. Dentro de estas últimas, las prácticas agroecológicas se proponen como una alternativa al manejo de la agricultura convencional, debido al supuesto mejor balance con la provisión de SE y su efecto rehabilitador y conservador (Bommarco et al., 2013). Actividades como la labranza intensiva, los monocultivos y el uso de agroquímicos en agricultura convencional, generan desequilibrios en el ambiente y menoscabo de uno o más SE, ya que la pérdida de uno puede inducir al detrimento de otros. En el caso de la labranza mecanizada, esta afecta directamente la estructura y altera los macroporos del suelo, lo que a su vez limita la infiltración de agua, ocasiona escorrentía y posteriormente, erosión y mermas de biodiversidad (N. Gómez, Villagra y Solórzano, 2018). En general, el uso del suelo y el cambio de cobertura vegetal impactan los SE al modificar las estructuras, procesos y funciones de los ecosistemas (W. Chen et al., 2019). Lo anterior, determina la creciente necesidad del rediseño de sistemas agrícolas y sus prácticas de manejo y su evaluación, en términos de los beneficios o perjuicios sobre los SE.

Los objetivos y métodos para el diseño de paisajes agrícolas particulares cambian acorde con el grado de intensificación y la combinación de SE deseados (Ekroos, Olsson, Rundlöf, Wätzold y Smith, 2014). Sin embargo, el objetivo es el manejo de paisajes multifuncionales que proporcionen conjuntos de SE. En este proceso, la implementación de prácticas agroecológicas se determina como una alternativa para restaurar las funciones del agroecosistema ya que, aumenta su capacidad de recuperación y autonomía (Landis, 2017). Altieri (2001), determina que, a través del desarrollo de estas prácticas se intenta imitar los procesos naturales en sistemas de producción agrícola, mejorando la comprensión del papel de la diversidad funcional, la optimización de reciclado de nutrientes, el aumento de la actividad biológica y la conservación de agua y suelo. En general, estas interacciones no solo promueven la conservación de los recursos, sino que salvaguardan los procesos y funciones ecológicas que sustentan la prestación de SE cruciales para la producción agrícola (e.g. ciclos de nutrientes en el suelo, hábitat para enemigos naturales, almacenamiento de carbono y retención de humedad, entre otros). Dentro de las prácticas agroecológicas más frecuentemente utilizadas, se encuentran la conservación del suelo, el aporte de abonos orgánicos, la rotación de cultivos, la diversificación productiva, el manejo de policultivos y los cultivos de cobertura (Contino et al., 2018). Recientemente, una práctica fundamental es el incremento de la biodiversidad funcional más allá de los límites de las unidades productivas, es decir en una escala de paisajes agrícolas. Acciones que en conjunto o de manera individual generan beneficios en el mantenimiento, incremento o recuperación de los SE.

En este contexto, los efectos de las prácticas agroecológicas sobre la funcionalidad de los agroecosistemas cobran relevancia y su estudio se incrementa. No obstante, su efecto sobre la provisión de múltiples SE necesita mayor profundización, socialización y desarrollo con productores y tomadores de decisiones. Según Dendoncker et al. (2018), el diseño innovador de sistemas agroecológicos multifuncionales requiere el conocimiento detallado de las relaciones entre los procesos, funciones y SE. Es necesaria su evaluación, tanto en condiciones previas, como después de la transición, ya que estos sistemas son entidades complejas con procesos y relaciones sinérgicas o de compensación. Por ejemplo, prácticas de manejo del suelo, como la labranza de conservación, los cultivos de cobertura y el aporte de materia orgánica, genera efectos complementarios, sinérgicos y de intercambio entre los SE en los agroecosistemas. Estos pueden activar la disponibilidad de nutrientes e incrementar los procesos biológicos del suelo, al mismo tiempo que aumentan las interacciones entre SE, como la filtración de agua y el secuestro de carbono. Así mismo, entre mayor es la diversificación productiva, mayor cantidad de hábitats para especies benéficas se encuentran, lo que permite controlar plagas de los cultivos (Balvanera, 2012).

Aunque diferentes estudios evidencian algunos efectos, es necesario ahondar sobre los efectos directos e indirectos, así como los modelos de abordaje e interpretación de los mismos, tomando en cuenta factores como la región, tipo de suelo, condiciones climáticas, etc.

La comprensión de las relaciones entre las prácticas agroecológicas y los efectos sobre los SE es fundamental para analizar las relaciones que ocurren entre los procesos ambientales de sistemas diversificados y de esta manera, incrementar o conservar viables los SE de regulación y mantenimiento. En esta vía Piazza, Ercoli, Nuti y Pellegrino (2019), dicen que la diversificación de cultivos aumenta las comunidades de organismos descomponedores en el suelo, que a su vez mejoran la estructura del suelo y el funcionamiento del agroecosistema al incrementar la disponibilidad de nutrientes y el almacenamiento de agua. También, Leijster et al. (2019), demostraron que las prácticas agroecológicas rehabilitan SE degradados por la intensificación agrícola. En su investigación evaluaron el efecto de la incorporación de compost, abonos verdes y labranza cero sobre diferentes SE en huertos de almendros. Dentro de sus resultados se destacan el mejoramiento de la productividad del cultivo en el corto plazo, debido a una mayor disponibilidad de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo; lo que a su vez estuvo relacionado con la diversificación de la comunidad microbiana del suelo. De esta manera, los SE de regulación y mantenimiento que incrementaron fueron, el ciclado de nutrientes, el stock de carbono, la regulación de los flujos de agua y la calidad y fertilidad del suelo. Los abonos verdes y el compost son la fuente principal de energía para la actividad microbiana que determina la disponibilidad de nutrientes y otros procesos biológicos en el suelo. Además, la adición de enmiendas orgánicas incrementa el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), la biomasa y la diversidad microbiana, esta última presuntamente vinculada con la diversidad funcional y la estabilidad ecológica (Larney, Li, Janzen, Angers y Olson, 2016; Urra, Mijangos, Epelde, Alkorta y Garbisu, 2020).

Lo anterior, evidencia las múltiples relaciones entre la implementación de las prácticas agroecológicas y los SE provistos por el suelo. No obstante, es preciso analizar los efectos sinérgicos, de intercambio o acumulativos sobre diferentes SE bajo estas consideraciones de manejo. Desde este enfoque, el objetivo central del presente estudio consiste en determinar cómo se ha evaluado el impacto de las prácticas agroecológicas sobre la conservación, incremento o interacción de múltiples servicios ecosistémicos en sistemas agrícolas. Los objetivos planteados se presentan a continuación:

- Determinar el efecto de las prácticas agroecológicas sobre el control biológico, la fertilidad y calidad del suelo, secuestro y almacenamiento de COS.
- Identificar el avance de la investigación entre las relaciones de implementación de prácticas agroecológicas y la provisión de SE de regulación y mantenimiento en agroecosistemas.

2. METODOLOGÍA

Estrategias de búsqueda

Revisión de literatura. La búsqueda de información científica se realizó inicialmente, en las bases de datos disponibles a través de la Biblioteca virtual Wilson Popenoe de la Universidad Zamorano. A partir de 23 términos claves individuales o combinados (descritos a continuación), en español e inglés y mediante su integración con los conectores booleanos AND/OR, se exploró en “PubMed, Springer Link, Redalyc, Scielo”. Los términos de búsqueda fueron: prácticas agroecológicas, servicios ecosistémicos de regulación y mantenimiento, agroecosistemas, paisajes agrícolas, fertilidad del suelo, calidad del suelo, control biológico, secuestro de carbono, gases de efecto invernadero (GEI), rotación de cultivos, enmiendas orgánicas, cultivos de cobertura, labranza cero y manejo de residuos. Adicionalmente, se realizó búsqueda en el sistema abierto de Google Académico y las bases de datos de acceso por suscripción como “Scopus, Science Direct, Nature” y “Web of Science”.

Criterios de selección de artículos. La selección de publicaciones a analizar tuvo como característica principal, que fueran artículos de investigación revisados por pares y que se contemplaran en el período comprendido entre 2005 y 2020. Como punto de partida el enfoque de análisis se centró en el efecto de prácticas agroecológicas sobre SE de regulación y mantenimiento acorde a la clasificación del CICES. De esta manera, se descartaron artículos referentes a la relación entre las prácticas agroecológicas y SE de provisión y culturales. Se seleccionaron 55 documentos bajo estas características en español e inglés. Posterior a la selección, estos documentos fueron tabulados en una base de datos en Microsoft Excel con características específicas como cultivos, duración del estudio, área geográfica de desarrollo y año de la publicación. Entre los parámetros de análisis se incluyeron clasificaciones basadas en prácticas agroecológicas implementadas, la integración o no de las mismas, los SE evaluados, las características ambientales y de suelos de los sistemas analizados y enfoque de las relaciones entre las prácticas y los SE.

Delimitación de SE de regulación y mantenimiento y prácticas agroecológicas a analizar. Los SE incluidos en el análisis fueron control de plagas y enfermedades, fertilidad y calidad del suelo, flujos de gases de efecto invernadero (GEI). En tanto que, las prácticas agroecológicas incluidas en el análisis fueron rotación de cultivos (RC), enmiendas orgánicas (EO), cultivos de cobertura (CC), labranza cero o mínima (L0, LM) y manejo de residuos (MR). Estas se analizaron de cuerpo con el enfoque de los estudios como estrategias individuales o conjugadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los agroecosistemas multifuncionales son sistemas agrícolas enfocados en la estabilidad ecológica para la producción y el funcionamiento de estos (Recanati y Guariso, 2018). Mantener el equilibrio ecológico en sistemas agrícolas, de acuerdo con Mancini, Bianchi, Maria y Tittonell (2021), está relacionado con la implementación de prácticas agroecológicas (PA), ya que estas potencian la diversidad ecosistémica y ofrecen variedad de SE de regulación y mantenimiento. Con el transcurso del tiempo, el estudio de este tema ha adquirido importancia a nivel mundial, puesto que los paisajes agrícolas que involucran prácticas convencionales se consideran causantes del deterioro y de la pérdida de los recursos naturales. En este sentido, en la Figura 1 se observan las evidencias del incremento en los estudios realizados en el período comprendido entre el 2000 y 2020. La relevancia de la investigación integradora entre prácticas agroecológicas y la provisión de servicios ecosistémicos “Agroecological practices and ecosystem services” presenta un incremento porcentual del 1,425% en “Science Direct” y 700% en “Springer Link”. El creciente interés por descubrir efectos positivos de las PA sobre la provisión de SE permiten rediseñar y planificar sistemas de producción agrícola en la actualidad. Los estudios revelan que las PA estabilizan los agroecosistemas que han sido alterados y perturbados por prácticas convencionales. No obstante, la capacidad de proveer SE en un sistema agrícola, depende de las condiciones climáticas, del tipo de manejo y del efecto que este supone sobre los procesos y funciones ambientales. Las PA analizadas en la revisión son determinadas por la aplicación de enmiendas orgánicas, manejo de residuos, labranza cero, rotación de cultivos y cultivos de cobertura.

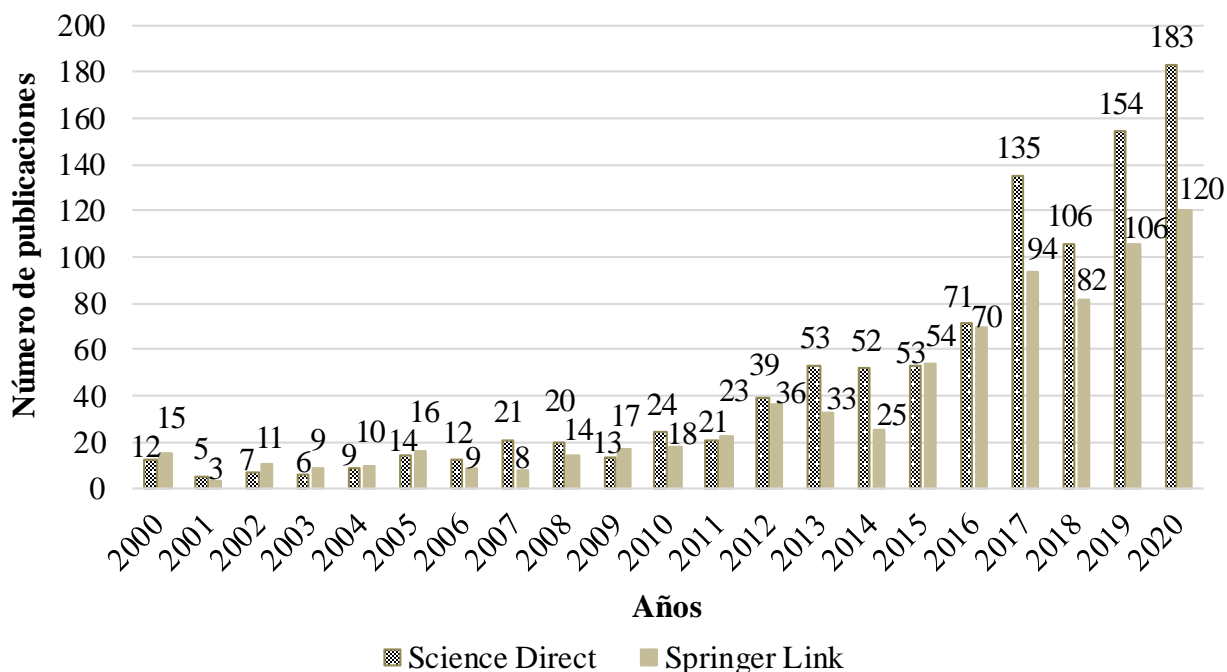


Figura 1. Reporte de estudios sobre el impacto de prácticas agroecológicas sobre SE en “Science Direct” y “Springer Link”.

Evaluar 55 publicaciones científicas (36 de ScienceDirect, 8 de Pubmed, 6 de Springer Link, 3 de Scielo, 1 de Wiley y 1 Google académico) permitió concluir que la aplicación de residuos es una de las prácticas más recurrentes en los estudios y la que mayor incidencia tienen entre diferentes SE de mantenimiento y regulación. Según los estudios reportados, el manejo de residuos tiene mayor incidencia sobre los SE relacionados con la fertilidad y calidad del suelo. En tanto que, hay menos estudios relacionados en el análisis del impacto entre los cultivos de cobertura y el control biológico. Así mismo, se puede observar que dentro de los efectos de las cinco PA analizadas, la introducción de enmiendas orgánicas al suelo mejora las relaciones entre poblaciones para el control de plagas y enfermedades, conocido con un SE de control biológico en los agroecosistemas (Figura 2).

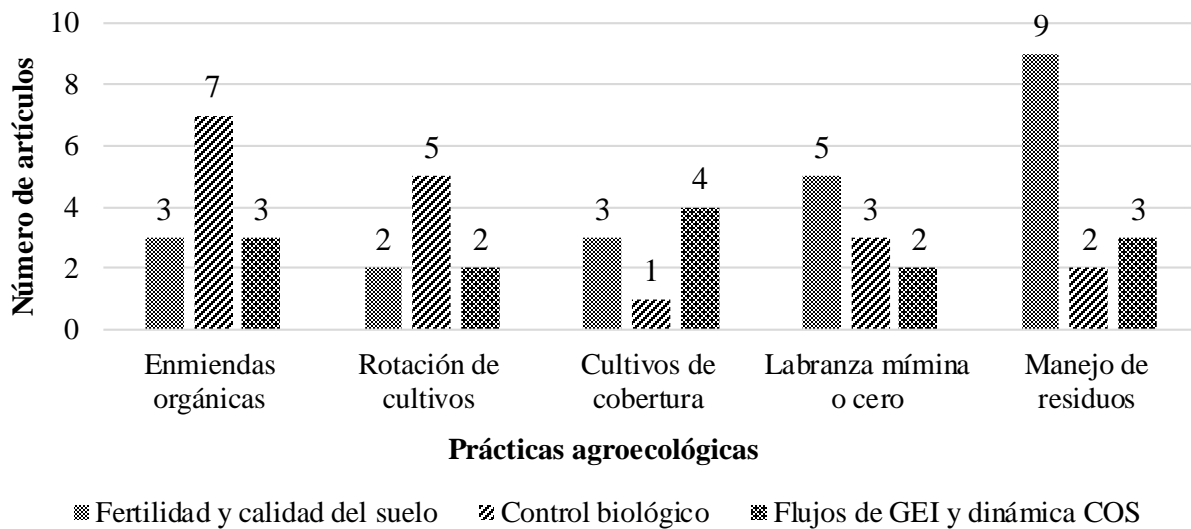


Figura 2. Estudios reportados del impacto de las prácticas agroecológicas sobre los SE de regulación y mantenimiento.

Como se mencionó con anterioridad el efecto de la implementación de prácticas o manejo agroecológico en sistemas agrícolas, es diferencial. Este depende de las condiciones locales de clima, suelos y heterogeneidad de los paisajes y repercute generalmente, sobre más de un SE. Por esta razón, los criterios de análisis permitieron enfocarse en la interpretación de las individualidades, similitudes y divergencias y de manera, desarrollar un análisis y reporte sistemático de los hallazgos de los diferentes estudios. Por ejemplo, un enfoque común en los estudios analizados tiene que ver con la duración de los experimentos de la relación entre la implementación de las PA y los servicios ecosistémicos, esta se refleja en enfoques a corto plazo para SE como control biológico, flujos de GEI y calidad de suelos, en tanto que, los impactos relacionados con la fertilidad y calidad del suelo y la dinámica de COS tienden a realizarse en el largo plazo (hasta 33 años) (Cuadro 1). Además, los enfoques para la integración de pares o múltiples SE están relacionados también con el largo plazo, al contrario, en donde fueron evaluados los SE de manera individual.

En cuanto al enfoque de los cultivos analizados, estos se agruparon en familias con el fin de determinar una nueva categoría de aproximación y se encontró que son especies o cultivares de las

familias *Poaceae* y *Fabaceae* las que predominan en la investigación. Esto puede estar relacionado con la necesidad de encontrar alternativas para desarrollar sistemas silvopastoriles o agroforestales con un menor impacto en el ambiente y la provisión de SE de mantenimiento y regulación. Según Accatino, Tonda, Dross, Léger y Tichit (2019), la producción ganadera tiene múltiples interacciones con otros SE fuera de los de provisión y puede promover sinergias, especialmente en los pastizales. Por otro lado, las regiones a nivel mundial para el desarrollo de los estudios en la temática son diversas. Con investigaciones reportadas en diferentes países de Asia, Europa, África, América Latina y Norteamérica, es China el país con más desarrollo de estudios sobre el impacto de las PA sobre los SE de regulación y mantenimiento (Cuadro 1).

Cuadro 1. Enfoque en cultivos, duración, área geográfica, prácticas agroecológicas y SE de regulación y mantenimiento de los estudios revisados.

Cultivos (familia)	Duración (años)	Región	Prácticas Agroecológicas	SE de regulación y mantenimiento	Referencia
<i>Fabaceae</i> , <i>Poaceae</i> , <i>Sapindaceae</i>	2	China	MR	Fertilidad y calidad del suelo	(Xiang, Zhang, Wei, Zhang y Zhao, 2018)
		General		Fertilidad y calidad del suelo	(Kibblewhite, Ritz y Swift, 2008)
		General	L0, LM, RC, MR	Fertilidad del suelo y flujos de GEI	(Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008)
		General	L0, LM, MR	Calidad del suelo	(Cotler, Martinez y Etchevers, 2016)
		General	MR, EO, RC	Fertilidad y calidad del suelo	(Julca, Meneses, Blas y Bello, 2006)
<i>Poaceae</i>	16	México	L0, MR, RC	Flujos GEI, fertilidad y calidad del suelo	(Fuentes et al., 2012)
	11	Dinamarca	MR	Fertilidad del suelo, flujos de GEI	(B. Gómez, Magid y Jensen, 2017)

Cultivos (familia)	Duración (años)	Región	Prácticas Agroecológicas	SE de regulación y mantenimiento	Referencia
		General		Fertilidad del suelo, control biológico, Flujos de GEI	(Lal, 2016)
<i>Poaceae</i>	10	Tailandia	EO, MR	Fertilidad del suelo, dinámica de COS	(Oechaiyaphum, Ullah, Shrestha y Datta, 2020) (Uzoh, Igwe, Okebalama y Babalola, 2019)
<i>Fabeaceae, Poaceae</i>	2	Nigeria	RC, MR	Fertilidad del suelo	(Tanaka, Katsuka, Toyota y Sawada, 2013)
		General		Fertilidad y calidad del suelo, dinámica de COS	
<i>Poaceae, Brassicaceae, Fabaceae, Solanaceae</i>	3	China	CC	Fertilidad y calidad del suelo, control biológico	(Qi et al., 2020)
<i>Fabaceae, Poaceae, Brassicaceae, Asteraceae, Hydrophyllaceae, Polygonaceae, Linaceae</i>	3	Suiza	L0, LM, CC	Calidad del suelo, control biológico	(Büchi, Wendling, Amossé, Necpalova y Charles, 2018)
		General	L0, LM	Calidad del suelo	(Torabian, Farhang-abriz y Denton, 2019)
<i>Poaceae</i>	9	India	L0, MR	Fertilidad del suelo	(Modak, et al., 2020)
		General		Fertilidad y calidad del suelo	(S. Smith y Read, 2008)

Cultivos (familia)	Duración (años)	Región	Prácticas Agroecológicas	SE de regulación y mantenimiento	Referencia
<i>Fabaceae, Poaceae</i>	12	España	L0	Fertilidad y calidad del suelo	(Vázquez, Benito, Espejo y Teutschero, 2020)
			RC, L0, LM	Fertilidad y calidad del suelo	(Goss, Carvalho y Brito, 2017) (A. Smith, Snapp, Dimes, Gwenambira y Chikowo, 2016)
<i>Fabaceae, Poaceae</i>	3	Malawi	RC	Fertilidad del suelo	(Kang, Seo, Kim y Cho, 2020)
<i>Poaceae, Fabaceae</i>	2	Corea del Sur	EO, RC	Fertilidad y calidad del suelo	(Zhong et al., 2010)
<i>Poaceae</i>	21	China	EO	Fertilidad del suelo	(Sofo, Palese, Casacchia y Xiloyannis, 2014)
		General	MR	Fertilidad y calidad del suelo	(He et al., 2007)
<i>Poaceae</i>	16	China	EO	Fertilidad del suelo	(Stewart, 2020)
		General	EO	Control biológico	(Selosse, Bessis y Pozo, 2014)
		General		Control biológico	(Pineda, Kaplan y Bezemer, 2017)
		General		Control biológico	
<i>Brassicaceae</i>	2	Países bajos		Control biológico	(Pangesti et al., 2015)

Cultivos (familia)	Duración (años)	Región	Prácticas Agroecológicas	SE de regulación y mantenimiento	Referencia
		General	EO	Control biológico, fertilidad y calidad del suelo	(Rowen, Tooker y Blubaugh, 2019)
		General	EO, MR	Control biológico, fertilidad y calidad del suelo	(Nyamwasa et al., 2020)
		Estados Unidos	EO	Control biológico	(Palma et al., 2018)
<i>Malvaceae, Poaceae, Fabaceae</i>	2	Estados Unidos	CC	Control biológico	(Bowers, Toews, Liu y Schmidt, 2019)
<i>Brassicaceae</i>	3	Alemania	RC	Control biológico	(Scheine y Martin, 2020)
<i>Poaceae, Fabaceae, Brassicaceae</i>	6	Suecia	RC	Control biológico	(Rusch, Bommarco, Jonsson, Smith y Ekbom, 2013)
		General	RC, CC, MR	Control biológico, fertilidad y calidad del suelo	(Nicholls, 2008)
		General	RC, CC, EO, L0	Control biológico	(Jabran, Mahajan, Sardana y Chauhan, 2015)
		General	CC, MR	Control biológico	(Farooq, Jabran, Cheema, Wahid y Siddique, 2011)

Cultivos (familia)	Duración (años)	Región	Prácticas Agroecológicas	SE de regulación y mantenimiento	Referencia
<i>Poaceae, Cucurbitaceae</i>	0.16	Zimbabwe	L0	Control biológico	(Baudron, Zamanallah, Chaipa, Chari y Chinwada, 2019)
		General	L0	Control biológico y calidad del suelo	(Rowen, Regan, Barbercheck y Tooker, 2020)
<i>Solanaceae</i>	2	Egipto		Control biológico	(Khalil, Ahmed, Allam y Dawood, 2019)
<i>Poaceae</i>	2	México	L0, MR	Control biológico, calidad del suelo	(Rivers, Barbercheck, Govaerts y Verhulst, 2016)
		General	CC, LM, RC	Control biológico, fertilidad y calidad del suelo	(Harrison et al., 2019)
<i>Poaceae</i>	6	China	RC, EO	Flujos de GEI	(Wu, Zhang, Dong, Li y Xiong, 2019)
<i>Poaceae</i>	1	China	EO	Flujos de GEI	(Yang et al., 2020)
<i>Poaceae, Fabaceae</i>	33	China	EO, RC	Dinámica de COS	(Wang et al., 2018)
<i>Rutaceae, Rosaceae, Vitaceae, Moraceae, Anacardiaceae</i>	1	España	CC, MR	Flujos de GEI y dinámica de COS	(Aguilera, Guzmán y Alonso, 2015)

Cultivos (familia)	Duración (años)	Región	Prácticas Agroecológicas	SE de regulación y mantenimiento	Referencia
	2	Chipre	MR	Flujos de GEI y fertilidad del suelo	(Anastopoulos et al., 2019)
<i>Poaceae</i> ,	1	Uruguay		Flujos de GEI y fertilidad del suelo	(Illarze, del Pino, Riccetto y Irisarri, 2018)
<i>Poaceae</i> , <i>Fabaceae</i>	15	Estados Unidos	RC, L0	Flujos de GEI	(Behnke, Zuber, Pittelkow, Nafziger y Villamil, 2018)
<i>Poaceae</i> , <i>Fabaceae</i>	13	India	RC	Dinámica de COS	(Krishna et al., 2019)
<i>Poaceae</i>	8, 14, 21	Kazajstán, Finlandia, Italia	L0, MR, CC	Dinámica de COS	(Valkama et al., 2020)
<i>Solanaceae</i> , <i>Malvaceae</i>	15	Estados Unidos	CC, L0, RC	Fertilidad y calidad del suelo, dinámica de COS	(Mitchell et al., 2017)
<i>Vitaceae</i> , <i>Fabaceae</i>	5	Italia	CC	Dinámica de COS	(Novara et al., 2019)
<i>Poaceae</i> , <i>Fabaceae</i>	15	Estados Unidos	RC, L0	Flujos de GEI	(Behnke y Villamil, 2019)
<i>Fabaceae</i>	1	Irán	L0, MR	Flujos de GEI	(Langeroodi, Osipitan y Radicetti, 2019)
		General	EO, CC, RC	Dinámica de COS	(Horwath y Kuzyakov, 2018)

En general, las investigaciones muestran que SE como la fertilidad del suelo, su calidad y capacidad de almacenar COS son incrementados por la implementación de diferentes PA. Su importancia radica en la capacidad que este recurso tiene para proveer nutrientes y mejorar las condiciones adecuadas para el crecimiento de los cultivos. De acuerdo con la Figura 4, los estudios reportados muestran que la fertilidad del suelo es el SE con mayor énfasis en el desarrollo de la investigación. Sin embargo, este SE siempre conlleva a la conservación e incremento de otros SE

asociados a los procesos funcionales que desencadenan esta característica de los suelos. La degradación de los suelos a través del manejo inapropiado de la fertilización y labranza despierta el interés mundial para buscar y diseñar sistemas alternos a las prácticas convencionales (PC). Modelos de manejo intensivo de los suelos, ligados a la agricultura convencional generan diservicios como la erosión, la subvaloración de la fertilidad natural del suelo y el ciclaje de la materia, entre otros, lo cual afecta el rendimiento de los cultivos. En este aspecto, se encontró que las PA mejoran la fertilidad mediante el suministro de materia orgánica (MO), la cual suministra no sólo carbono (C) sustrato energético para los microorganismos, sino que su actividad dispone nutrientes para diferentes procesos metabólicos (Kibblewhite et al., 2008), entre ellos la asimilación por parte de las plantas. Del mismo modo, incide en la calidad y salud del suelo, al soportar los procesos ecológicos que determinan la capacidad del agroecosistema para desarrollar diferentes interacciones y mantener el equilibrio dinámico en el sistema. Con relación a lo anterior, de acuerdo con Kibblewhite et al. (2008) este SE depende de las transformaciones del C, el ciclo de nutrientes y el mantenimiento de estructuras que participan en los procesos biológicos en conjunto con microorganismos.

Las PA en sistemas agrícolas también proveen un sistema sostenible para la protección o mantenimiento de los flujos de energía y los ciclos de materia, así como en el incremento de la resiliencia. Los agroecosistemas manejados con prácticas agroecológicas se caracterizan por su diversidad y funcionalidad biológica. Así como también, por las sinergias que estas establecen en la fijación de nitrógeno atmosférico, regulación del ciclo de nutrientes, los flujos de GEI y el mantenimiento de la comunidad biológica y funcional en el suelo, que contribuye al control biológico. No obstante, en estas últimas interacciones, se encontró que el número de investigaciones es menor (Figura 3). El control biológico en agroecosistemas con PA, puede verse incrementado ya que la creación de hábitat apropiados y la expresión de los rasgos funcionales de miembros de la comunidad biológica ayudan a suprimir plagas y enfermedades. Para Nicholls (2008), la regulación de plagas depende de la biodiversidad planificada y no planificada en el manejo del agroecosistema y por la biodiversidad asociada al ambiente circundante. Además, afirma que las PA incrementan la diversidad de enemigos naturales que disminuyen la abundancia de plagas en los cultivos. No obstante, el efecto supresor depende de las comunidades microbianas presentes en el suelo (Lal, 2016), así como también, de su calidad y salud ya que, esto favorece la interacción y desarrollo de sinergias que proveen múltiples SE de mantenimiento y regulación.

Entre los diversos SE de regulación y mantenimiento dependientes de la salud y calidad de los suelos también se encuentra la mediación en los ciclos biogeoquímicos. Su influencia se evidencia en la regulación del clima local y global, así como en la dinámica de los flujos e inlfujos de GEI suelo atmósfera. Es evidente que las emisiones de GEI en sistemas agrícolas es determinada por las características de los suelos, el tipo de manejo y las condiciones climáticas y su importancia radica en la mitigación al cambio climático. El suelo es uno de los más grandes sumideros de GEI ligados al ciclo del carbono y esto incrementa el interés por la implementación de PA para el secuestro de COS y la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) desde el sector agrícola. Las PA conservan los agregados del suelo y disminuyen la exposición del COS lo que conlleva a la reducción de la descomposición microbiana del C y N (nitrógeno) y menores emisiones de GEI (Ruiz, Hurtado, Carrillo y Parrado, 2019). Aunque faltan mayores estudios en esta temática, en la última década tienden a incrementarse. Estos evidencian los resultados positivos de mantener los suelos cubiertos, reducir la labranza y disminuir el aporte

de fertilizantes nitrogenados que estos pueden ocasionar impactos negativos como el cambio de pH, en este sentido las PA permiten reducir las emisiones de GEI desde el suelo a la atmósfera.

Los resultados determinan que los estudios se desarrollan en el marco de comprender las relaciones entre la dinámica del COS y los flujos de los GEI en agroecosistemas bajo prácticas agroecológicas. No obstante, también llevar a determinar cómo este SE de regulación depende de las condiciones climáticas y las propiedades de los suelos. Por ejemplo, las actividades de las comunidades microbianas del suelo son afectadas por temperaturas altas que aumentan los flujos de GEI (Ondrasek et al., 2019). Así mismo, las emisiones de CO₂ están correlacionadas con altas tasas de descomposición de MOS (mineralización), que libera este GEI (Langeroodi et al., 2019). En tanto que, las emisiones de N₂O, están relacionadas con aportes de fertilizantes, específicamente cuando se aumentan los procesos de nitrificación y consecuentemente la desnitrificación que reduce el NO₃ disponible y no absorbido por las plantas, en compuestos gaseosos, entre ellos el N₂O (H. Chen, Mothapo y Shi, 2014). Finalmente, las emisiones de CH₄ en sistemas agrícolas están relacionadas con suelos anegados y producidas por microorganismos metanogénicos, como las *Archaea*, mediados por procesos de descomposición de la materia orgánica que requieren de anaerobiosis estricta y un bajo potencial de óxido-reducción (Franco-Luesma et al., 2020).

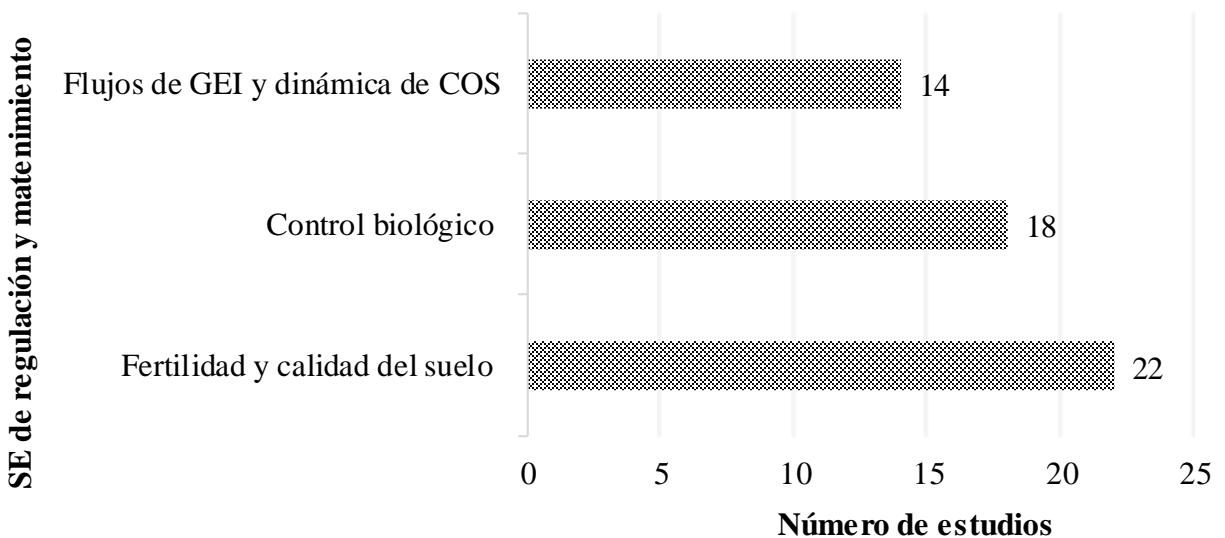


Figura 3. Estudios reportados sobre el impacto de PA sobre los SE de regulación y mantenimiento provistos por el suelo.

En resumen, los estudios muestran que los efectos de la implementación de las prácticas agroecológicas sobre los SE de regulación y mantenimiento son positivos y alcanzan una importancia global en la actualidad. A continuación, se detalla el análisis sistemático de cada una de las prácticas a partir del análisis de revisión descrito con anterioridad.

Efecto de prácticas agroecológicas sobre la fertilidad y la calidad de suelo

La fertilidad y calidad de los suelos son características esenciales en el desarrollo y mantenimiento de los sistemas agrícolas a nivel mundial. Aunque en la actualidad las formas de producción de alimentos y ornamentales, también se derivan de cultivos en sustratos de diferentes orígenes, estos suelen ser más costosos y poco viables para la mayoría de los productores. Como se determinó, la mayoría de los estudios sobre el impacto de la implementación de PA se ha realizado en cultivos de las familias *Poaceae* y *Fabaceae* (Cuadro 1). Aparte de estar relacionado con la búsqueda de estrategias que reduzcan el impacto de la ganadería sobre la estructura del suelo y sus múltiples funciones. Los procesos están relacionados con las interacciones que los animales tienen con el suelo a través de la deposición, el pisoteo y la compactación y el establecimiento de plantas con buenos contenidos nutricionales para la alimentación de los animales, que además cumplen otros propósitos sobre el suelo. Por ejemplo, las leguminosas tienen la capacidad de fijar N por la acción simbiótica con microorganismos, lo cual favorece la disponibilidad de nutrientes para otras plantas. En este sentido, Xiang et al. (2018), determinaron que la incorporación residuos de *A. hypogaea* y *S. guianensis* en cultivos de *Dimocarpus longan*, aumentó la disponibilidad de N en el perfil superior e inferior del suelo, lo cual estuvo relacionado con mayor contenido de C orgánico lábil que estimuló la actividad microbiana. Esto indica que los desechos de leguminosas restauran las propiedades fisicoquímicas del suelo y mejoran la actividad metabólica del suelo. Adicionalmente, incrementan en la productividad del cultivo asociada a la asimilación de nutrientes, lo que en consecuencia determina que no sólo hay efectos en los SE de regulación y mantenimiento, sino también en los de provisión.

Por otro lado, Kibblewhite et al. (2008) manifiestan que la calidad del suelo está relacionada por la transformación del C. Según Fuentes et al. (2012) el manejo de residuos (MR) en cultivos aumenta el contenido del carbono orgánico del suelo (COS) asociados a los macro agregados y su dinámica estabiliza la estructura del suelo. Así mismo, el COS modifica el pH llevándolo a la neutralidad, lo cual favorece la disponibilidad de nutrientes, al tiempo que restaura la estructura y la porosidad que favorece la retención de agua (Cotler et al., 2016; Guillemot, Maire, Munishamappa, Charbonnier y Vaast, 2018; Martínez et al., 2008). Bajo este mismo enfoque, Oechaiyaphum et al. (2020), encontraron que la incorporación de paja de arroz en arrozales incrementa el COS favoreciendo la formación de agregados estables al largo plazo. Lo anterior está relacionado con la característica de que los residuos hacen parte de la materia orgánica del suelo (MOS) y esta última define las propiedades físicas del suelo como la formación de agregados, la estabilidad estructural y la porosidad. Además, determina las propiedades químicas relacionadas con la reserva y disponibilidad de nutrientes y con las propiedades biológicas, ya que determina la mineralización y es la base de la alimentación de la microbiota del suelo (Julca et al., 2006; Li et al., 2020).

De acuerdo con Lal (2016), la MOS comprende alrededor del 45 al 60% de su masa como COS y, por tanto, es una fuente principal de energía para los microorganismos del suelo. Sin embargo, la fertilidad del suelo dependerá de la calidad de los residuos y del efecto que supone sobre disponibilidad de nutrientes y MO (Uzoh et al., 2019). En este sentido B. Gómez et al. (2017) demostraron que, los desechos con una relación C: N baja, mejoran la fertilidad química asociada al incremento en la disponibilidad del contenido de N al corto y al largo plazo, además de optimizar la capacidad física en la retención de agua. En resumen, Lal (2016), determina que la concentración de C (COS), el cual depende de las entradas de residuos y la cantidad de MOS, junto con su calidad y dinámica, es esencial para diversas funciones del suelo y servicios ecosistémicos. Por lo tanto,

el suelo es un espacio de interacciones mediado por el COS a través de sus fases sólida, líquida y gaseosa y que interactúan a una escala que va desde nanómetros a kilómetros. Además, genera entornos dinámicos propicios para el crecimiento y desarrollo de plantas y otra biota. Por lo anterior, en la implementación de PA es importante considerar los componentes principales de la MOS propuestos por Lal (2016) y que se resumen en: (1) residuos de plantas y animales y biomasa microbiana viva; (2) MOS activa o lábil y (3) MOS relativamente estable.

Los residuos orgánicos provenientes de diferentes cultivos retornan al ambiente nutrientes y energía y generan efectos positivos sobre la dinámica del COS y por tanto en la fertilidad y calidad del suelo, pero también generan acciones sobre los flujos de GEI. Los resultados muestran que los cultivos de cobertura (CC) de plantas de las familias *Poaceae* y *Fabeaceae*, *Brassicaceae* (Cuadro 1), al ser incorporados en sistemas agrícolas mejoran las propiedades del suelo. Además, los CC de leguminosas suministran nutrientes mediante la fijación de N y su descomposición y mineralización determinan la disponibilidad de nutrientes para la biota y microbiota. En relación con lo anterior, Qi et al., (2020) concluyen que el incremento de MO y COS en los cultivos trigo, genera gran cantidad de residuos de biomasa y contribuye a la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Así mismo, estos CC incrementaron la abundancia, reproducción y crecimiento de microorganismos benéficos, al crear un microclima favorable en el perfil superficial del suelo, lo cual redundaba en la actividad microbiana, los procesos metabólicos y la fertilidad de los suelos

La importancia del aumento de los procesos metabólicos funcionales en los suelos radica en el efecto sobre el ciclado de nutrientes. Estos procesos están relacionados con la degradación de tejidos vegetales, la fijación de N, la mineralización de la MOS y la disponibilidad de nutrientes. Aspectos que, en conjunto, como se mencionó antes, contribuyen en la productividad de los cultivos a través del crecimiento radicular y abastecimiento de nutrientes (Tanaka et al., 2013). Por esta razón, el estudio de Qi et al. (2020) hace énfasis sobre el manejo de CC en las PA. En efecto, en producciones de trigo, los CC además de estimular el desarrollo de poblaciones benéficas, generaron mecanismos idóneos que resultaron en la expresión de genes funcionales para mejorar el ciclaje de nutrientes y reducir las colonias de bacterias patógenas que competían con el cultivo para obtener nutrientes. Así mismo, Büchi et al. (2018) afirman que la restauración de las propiedades del suelo en sistemas intensivos agrícolas, a partir de la implementación de CC aumentan las concentraciones de N disponible y la acumulación de COS, lo que genera procesos de estabilidad ecológica para la conservación de la calidad y salud del suelo. Por el contrario, en donde el cultivo estaba libre de CC se evidenció una dramática reducción del COS y un mayor crecimiento de malezas que competían para obtener luz, espacio, agua y nutrientes con planta principal del agroecosistema, con el consecuente impacto en la calidad y salud del suelo.

La calidad y, por tanto, la fertilidad de los suelos también puede afectarse con las prácticas de labranza. En las PA, se considera la labranza cero como una estrategia que tiene un efecto positivo. La L0 no afecta la calidad debido a que no modifica la estructura y conserva la estabilidad de los agregados (Torabian et al., 2019), lo cual disminuye la exposición y pérdida del COS. Los pequeños y grandes macroagregados tienen alto contenido de COS cuando no hay perturbación del suelo o esta es mínima (Fuentes et al., 2012). Esto indica que calidad del suelo mejora, se mantiene o estabiliza a partir de esta práctica. Según Modak et al. (2020), el COS en los macroagregados aumenta entre el 25 al 30% en los primeros 15 cm del suelo, cuando estos se manejan bajo L0. No obstante, la labranza convencional (LC), destruye los agregados exponiendo el COS almacenado en su interior y como consecuencia, se origina mayor oxidación de la MOS

por tanto, pérdida del carbono almacenado. Además, las PA de L0 no alteran la diversidad funcional de los agroecosistemas y permite aumentar la cantidad de microbiota del suelo, especialmente hongos micorrízicos arbusculares (HMA) que fomentan a la absorción de nutrientes de los cultivos (Vázquez et al., 2020). Lo que a su vez se refleja como un SE de regulación y mantenimiento relacionado con la fertilidad y actividad biológica de los suelos. De acuerdo con Goss et al. (2017) la colonización de la rizosfera de especies de HMA puede verse incrementada en sistemas de L0, lo que a su vez mejora la productividad de los cultivos. Esto se debe a que, las hifas de los HMA tienen la capacidad de absorber nutrientes inmóviles del suelo para trasladarlos por acción simbiótica hasta las plantas. Además, las secreciones que las hifas generan se adhieren a los agregados dando mayor estabilidad frente a condiciones adversas como alta disponibilidad de agua en el espacio poroso del suelo (S. Smith y Read, 2008) o agrietamiento y desecación de los suelos en períodos de estrés hídrico. En general, la fertilidad microbiológica está relacionada a la descomposición de MO para la solubilidad y disponibilidad de nutrientes, de esta manera actúan los grupos funcionales bacterianos involucrados en el ciclaje de nutrientes del N y C (Sofa et al., 2014).

De otro lado, la fertilidad del suelo y su calidad también puede verse afectada por la diversificación productiva a través de la rotación espacial y temporal de los cultivos. Uzoh et al. (2019), muestran que la implementación de PA como RC con plantas de la familia *Fabeaceae* y *Poaceae*, aumentan el contenido y disponibilidad de N en el corto plazo, a partir de la cantidad de biomasa que estas plantas producen y entra al suelo por la caída de hojarasca, además de la fijación del nitrógeno atmosférico. El estudio además determinó que las altas cantidades de N en el suelo y relacionadas con la leguminosa, redujo la relación de C: N e incrementó la cantidad de N aprovechable para el cultivo lo que produjo un mayor rendimiento. También, bajo este mismo enfoque de PA, A. Smith et al. (2016), incluyeron RC con dos especies de leguminosas cultivadas de forma intercalada en rotación con el maíz. Los resultados fueron positivos para la provisión de SE de regulación y mantenimiento. La asociación de estos cultivos al largo plazo no sólo favoreció la fertilidad a partir de una mayor disponibilidad de nutrientes, sino que adicionalmente, mejoró la disponibilidad de agua, lo que representa un SE muy importante en zonas secas. Así mismo, se observó que este sistema reduce la compactación en comparación con el manejo de monocultivos, lo cual favorece el desarrollo radicular y el crecimiento microbiano. No obstante, los autores determinan que los beneficios de esta PA se reducen cuando involucran especies que no se complementan o sus niveles nutricionales son diferentes.

Los procesos funcionales ligados a la fertilidad del suelo son diversos y como se ha descrito, pueden estar determinados por el manejo del sistema agrícola. Dentro de estos mecanismos las PA juegan un rol fundamental, ya que garantizan la actividad biológica, la disponibilidad de nutrientes, el movimiento del agua, el desarrollo del sistema radicular y la interacción entre los diversos factores. Los resultados del análisis muestran que el uso de EO como parte de las PA, juega un papel fundamental en el mantenimiento de la calidad y salud de los suelos agrícolas. Por ejemplo, Kang et al. (2020) determinaron que el uso de estiércol líquido de cerdo (ELC) estandarizado en cultivos de arroz, incrementó el suministro de nutrientes, el contenido de MOS y la biomasa microbiana del suelo. En general, la aplicación de residuos orgánicos compostados proporciona los mecanismos para el aumento del COS, así como la disponibilidad de N, P, K a través del suministro de recursos que activan la acción de la microbiota del suelo (Zhong et al., 2010). Así mismo, en cultivos de arroz en Tailandia Oechaiyaphum et al. (2020), encontraron que las concentraciones de N, P total y COS se aumentaban en un 118% cuando se incorporaba compost

y estas estaban disponibles por períodos más largos en el sistema agrícola a diferencia de los fertilizantes minerales. Estos últimos, inducen a la fertilidad del suelo de forma limitada y en el corto plazo, mientras que las EO mejoran la disposición en el largo plazo; además, aumentan la diversidad funcional microbiana, que repercute en la cantidad de nutrientes disponibles para la planta (Zhong et al., 2010). Por otro lado, los efectos de los fertilizantes minerales al largo plazo se ven reflejados en la reducción del pH y la consecuente acidificación y salinización. El cambio de pH sobrelleva impactos que tienen efectos sobre la abundancia y funcionalidad de la población microbiana y su metabolismo puede verse afectado por la baja disponibilidad de nutrientes, incidiendo negativamente en la capacidad de proveer SE de regulación y mantenimiento (He et al., 2007).

En resumen, la salud y la fertilidad del suelo juegan un rol fundamental en la capacidad de los agroecosistemas manejados bajo PA, para soportar la demanda de nutrientes por parte de las plantas. Además, en la provisión de sostén y anclaje, el desarrollo radicular y la disponibilidad de agua para el buen desarrollo y productividad, pero también tienen un papel crítico en la regulación de plagas y enfermedades. Esto se atribuye a la multifuncionalidad de las PA que provocan cambios positivos en las interacciones suelo-planta-atmósfera. Lal (2016), dice que una estrategia primordial para reducir la incidencia de enfermedades y plagas en sistemas agroecológicos es el mejoramiento de la salud del suelo mediante el incremento del almacenamiento de COS, la biodiversidad del suelo, la implementación de coberturas vegetales vivas permanentes, la diversificación del uso de la tierra y el manejo integrado de nutrientes. Lo cual puede considerarse como un mecanismo de intensificación ecológica que determina una mayor provisión de SE

Efecto de prácticas agroecológicas sobre el control biológico

Los SE relacionados con el control de plagas en sistemas agrícolas es fundamental para la viabilidad de la productividad y el mantenimiento de las condiciones apropiadas para la dinámica poblacional. Por ejemplo, He et al. (2007); Nyamwasa et al. (2020); Palma et al. (2018); Pangesti et al. (2015); Pineda et al. (2017); Rowen et al. (2019); Selosse et al. (2014) y Stewart (2020), coinciden que la introducción de EO en el manejo de prácticas agroecológicas inciden en el control biológico de los agroecosistemas. Los estudios evidencian que es un tema que está tomando relevancia en los últimos años (Figura 3). Esta PA propicia un ambiente adecuado para reproducción y crecimiento de los microorganismos que pueden actuar como controladores de especies plaga en los agroecosistemas. Para Stewart (2020), la aplicación de compost y abonos verdes no sólo restauran las propiedades físicas del suelo y favorecen el desarrollo radicular, entre otras acciones, sino que promueve la diversidad y la colonización de microorganismos que controlan enfermedades y plagas. También, Selosse et al. (2014) y Pineda et al. (2017) concluyen que el manejo de EO incrementan las acciones del microbioma del suelo, lo cual provoca cambios químicos y moleculares en las plantas que producen resistencia frente a plagas aéreas. Esta acción está relacionada con las señales químicas emitidas por la microbiota que favorece la interacción de los componentes bióticos del agroecosistema y ha tomado fuerza en los últimos años bajo el estudio de ecología química de los suelos. Así, el desarrollo y fortalecimiento de la rizosfera a través de PA, induce inmunidad en las plantas contra patógenos e insectos (Selosse et al., 2014). En efecto, el estudio de Pangesti et al. (2015), la rhizobacterium *Pseudomonas fluorescens* WCS417r actúa ampliamente como un mecanismo de defensa de cultivos afectado por masticadores. Además, su acción estaba relacionada con el comportamiento de las rizobacterias para propiciar un microclima favorable para la reproducción de parasitoides de la plaga y se

reflejaba en el incremento del SE de regulación y mantenimiento. El estudio de estas relaciones es muy importante para determinar su efecto sobre los SE. Los microorganismos son excelentes indicadores de la calidad del suelo porque sus propiedades dentro de la comunidad cambian rápidamente en respuesta a los cambios en el medio ambiente circundante (Santamaría et al., 2018).

La microbiota responde a cambios con facilidad, la abundancia puede ser alterada positiva o negativamente con relación a los manejos dentro de los sistemas agrícolas. En este contexto, Rowen et al. (2019) manifiestan que las EO de origen animal generan un hábitat favorable (MOS, retención de agua y COS) para depredadores y descomponedores que suprimen poblaciones de plagas. Así mismo, incrementan el contenido de micronutrientes para la planta y aumenta las defensas químicas que las protegen de los herbívoros. Por otro lado, el aporte de EO y su efecto sobre el control de plagas depende del estado de descomposición de la MOS. Respecto a lo anterior, Nyamwasa et al. (2020) demostraron que, la aplicación del estiércol de vaca con MOS en descomposición incrementaba la oviposición de *Holotrichia oblitera* hasta en el 61.6%, mientras que se reducía al 36.41% cuando la MOS de la enmienda estaba descompuesta. Lo cual también mostró una correlación positiva con el contenido de humedad del suelo y el daño ocasionado por la plaga en el cultivo. El manejo apropiado de las EO tiene un efecto positivo sobre el control biológico. Sin embargo, cuando no se hace de esta manera acelera el crecimiento de organismos plaga y reduce los efectos sobre los SE. También, la combinación con cultivos de cobertura y estrategias de diversificación de cultivos puede incrementar las acciones sobre el control de plagas y la productividad de los cultivos.

El manejo del hábitat en y alrededor de los campos agrícolas a través de los cultivos de cobertura, puede proporcionar ambientes estables que ayuden a la proliferación de comunidades enemigas naturales que moderan las poblaciones de plagas y las lesiones sobre los cultivos de interés (Bowers et al., 2019). En su estudio, los autores determinan que el uso de cereales de centeno como cultivos CC en campos de algodón incrementó la abundancia y diversidad de enemigos naturales de poblaciones clave de plagas, lo que tuvo una clara incidencia en los servicios de control biológico y rendimiento del cultivo. Estos resultados sugieren que los productores convencionales podrían utilizar CC para reducir los insumos de insecticidas mediante reducciones naturales en la presión de las plagas y en general, no sólo dejarían de incurrir en costos de producción adicionales, sino que disminuirían el impacto por una mayor provisión de SE de regulación y mantenimiento. Por otro lado, Qi et al. (2020) evidenciaron que la introducción de CC de plantas de las familias *Poaceae*, *Brassicaceae*, *Fabaceae* disminuían la incidencia del marchitamiento bacteriano en tabaco hasta en un 21.45%. Aspecto relacionado con el incremento de la actividad microbiana en el suelo y que protegen los cultivos de las enfermedades, al cambiar la dinámica de comunidad bacteriana, principalmente de los géneros *Achromobacter*, *Ralstonia* y *Rhodanobacter* causantes de la enfermedad.

La diversificación de los agroecosistemas a través de la rotación espacial y temporal de cultivos es otra estrategia para la reducción de la incidencia de organismos plaga. La RC es una PA que impacta positivamente al disminuir poblaciones de plagas y malezas. De acuerdo con los estudios revisados está práctica actúa como un mecanismo de biocontrol y es una de las más estudiadas (Figura 3). Su aplicación tiene mayor auge en las últimas décadas debido al efecto exponencial del uso de agroquímicos en el control de plagas y malezas en sistemas agrícolas. En este sentido, Scheine y Martin (2020) evaluaron la densidad y variabilidad de pulgones y masticadores en un

sistema de RC. Se encontró que, la diversidad de cultivos reducía las poblaciones de masticadores, aunque no tenía efectos sobre la densidad de pulgones. Sin embargo, favoreció el crecimiento de parasitoides que afectan a los pulgones. Lo cual evidencia que la capacidad del sistema en controlar la incidencia de plagas y la proliferación de malezas depende de la complejidad y estructura dada al agroecosistema a través de la implementación de PA. En efecto, Rusch et al. (2013) determinan que el desarrollo de paisajes complejos mediante la combinación entre hábitat semi-natural y sistemas agrícolas con una RC más diversificada (al menos tres cultivos durante seis años), mejora la actividad depredadora de los enemigos naturales mejorando así el SE de regulación y mantenimiento.

La abundancia de enemigos naturales y parasitoides está relacionada con la diversidad del sistema y su capacidad para proveer recursos para alimentación y refugio (Nicholls, 2008). Lo cual, además, acrecienta la capacidad de controlar las plagas y establecer un equilibrio dinámico en las poblaciones ligadas al desarrollo de los cultivos. Por otro lado, las poblaciones de malezas también generan impactos negativos en los rendimientos de los cultivos. Estas compiten por alimento, espacio y luz y son hospederas de plagas y propagan enfermedades. Los estudios demuestran que el manejo de RC y su combinación con CC tienen un efecto positivo sobre la densidad y crecimiento de las malezas (Davis, Hill, Chase, Johanns y Liebman, 2012). Adicionalmente, su implementación reduce el uso de herbicidas y evita la contaminación de aguas subterráneas. Farooq et al. (2011) y Jabran et al. (2015), determinan que el desempeño la RC es mucho más eficiente cuando se incluyen relaciones de antagonismo fitoquímico o alelopatía. La finalidad de este método es integrar cultivos alelopáticos en rotación (sorgo, maíz, centeno, y brasicas, entre otras), de tal forma que los alelos químicos producidos inhiban el crecimiento de las malezas. Sin embargo, es importante asociar los cultivos de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas ya que, puede ocasionar diservicios en lugar de servicios, que perjudican el crecimiento y desarrollo de plantas y microorganismos. La integración de estos aspectos, con las prácticas de conservación de suelos, incremento de las tasas de ciclaje de nutrientes a partir de los CC y las EO, aumenta la complejidad de los sistemas agrícolas y lleva a una mayor provisión de SE.

Es evidente que las PA tienen efectos sobre múltiples SE de regulación y mantenimiento. En general, su implementación lleva a que se articulen procesos ambientales con resultados en cascada. Por ejemplo, Baudron et al. (2019), al implementar L0 en cultivos de maíz concluyeron que la no perturbación del equilibrio ecológico de los organismos edáficos se manifestó en mayores tasas de depredación del gusano cogollero. Además, de conservar las propiedades del suelo para los SE de regulación y mantenimiento ampliamente descritos con anterioridad. De acuerdo con Rowen et al. (2020) la L0 estimula la diversidad y abundancia de la población de depredadores. No obstante, en sistemas de producción que practican LC, las tasas de plagas foliares pueden aumentar ya que el banco de semillas crece más rápidamente y se convierte en hábitat para organismos plaga. Esta práctica también beneficia, la colonización de otro grupo importante de organismos que son HMA y se generan sinergias para disminuir plagas y enfermedades (Goss et al., 2017). También la capacidad de los HMA como biocontrol de la mancha bacteriana en cultivos de papa bajo práctica de LC, ha sido evaluada. Estos organismos no solo mejoraron el crecimiento del cultivo por la colonización de las raíces, sino que produjeron compuestos biológicos que desarrollaron características de resistencia sistémica contra patógenos en las plantas (Khalil et al., 2019).

De otro lado, la combinación de RC, manejo de residuos con LO en sistemas maíz- trigo tiene efectos positivos sobre las comunidades de enemigos naturales y, por tanto, en el SE de control biológico (Rivers et al., 2016). Los resultados fueron evidentes en el incremento de la a tasa de depredación, lo que redujo los daños causados por el gusano cogollero. Para Harrison et al. (2019), esta dinámica está dada por el contenido de COS que aportan los residuos agrícolas ya que, proveen las condiciones adecuadas para la colonización de insectos depredadores naturales. Así mismo, manifiesta que la diversificación productiva a partir de la RC, mejora la complejidad del agroecosistema y fomenta la diversidad y establecimiento de poblaciones de enemigos naturales que intervienen en la dinámica de la comunidad de organismos en el agroecosistema. En resumen, el desarrollo de PA individuales o de manera conjugada es un factor determinante en el aumento de la complejidad de los agroecosistemas y, por tanto, en la generación de propiedades emergentes que se reflejan en mayor cantidad de SE de regulación y mantenimiento.

Efecto de prácticas agroecológicas sobre los flujos de GEI y la dinámica del COS

En términos generales las EO son consideradas como una PA, capaz de almacenar e incrementar el COS y reducir o incrementar las emisiones de N_2O , CO_2 y CH_4 desde el suelo a la atmósfera. Cuando las EO son aportadas sin el debido proceso de estabilización aumenta la carga microbiana y su actividad, lo que se refleja en mayores tasas de respiración heterotrófica y, por tanto, mayores flujos de CO_2 desde el suelo. Además, si la humedad en el suelo es apta para generar condiciones anaeróbicas la descomposición de los residuos orgánicos aumenta las emisiones de CH_4 por procesos metanogénicos. Por el contrario, si las EO son introducidas al suelo en las condiciones adecuadas los efectos sobre la dinámica del COS y la disminución de las emisiones de GEI son positivos. En efecto, diversos estudios muestran la eficacia del uso de biocarbón para mitigar emisiones de GEI y el incremento del COS. Según Wu et al. (2019), una sola aplicación de biocarbón en sistemas de RC de arroz y trigo redujo las emisiones de N_2O a largo plazo. Así mismo, Yang et al. (2020) presentan evidencias del impacto positivo de la aplicación de biocarbón en diferentes cultivos como una alternativa para mitigación los aportes al cambio climático, a través de la reducción en las emisiones de CO_2 y N_2O . Por ejemplo, la aplicación de biocarbón en cultivos de maíz, a razón de 30 t ha^{-1} disminuyó drásticamente las emisiones de CO_2 y N_2O e incrementaron el COS, después de procesos de manejo intensivo en la zona.

Las EO en los suelos agrícolas tiene alto potencial de secuestro de COS, a partir de primer año de la aplicación en la capa superior (0 – 15 cm). En tanto que, a partir del segundo año el secuestro puede aumentar desde las capas superiores e inferiores (0 – 15 y 15 – 30 cm) (Yu, Zha, Zhang y Ma, 2019). Lo anterior concuerda con el estudio de Wang et al. (2018), quienes determinaron que la incorporación de abono a partir de estiércol en un sistema de RC aumentó la cantidad de COS. El abono de estiércol mejora la calidad del suelo, debido a su alto contenido de MOS, lo cual repercutió en la estabilización los agregados en donde el COS es almacenado y protegido de procesos biológicos como la mineralización por acción de los microorganismos (Wang et al., 2018; Zhong et al., 2010).

La biomasa de los residuos de cultivos incrementa las reservas de C en el suelo y mejora el balance de las emisiones GEI en paisajes agrícolas (Aguilera et al., 2015). La integración de desechos agrícolas compostados favorece la acumulación de COS y reducen las emisiones de N_2O . El MR generó mecanismos de actividad microbiana que determinó el equilibrio funcional de la comunidad de microorganismos y redujo las emisiones causadas por procesos de desnitrificación

(Anastopoulos et al., 2019). Las comunidades microbiales son responsables de controlar los flujos de los GEI y tienden a cambiar su densidad poblacional y metabolismo de acuerdo con las condiciones del entorno en cortos periodos de tiempo. Por esta razón, la aplicación de los desechos en cultivos no debe ser regular ya que, al incrementar el contenido de MOS, la mineralización del N orgánico puede incrementar los procesos de desnitrificación y perderse a la atmósfera en forma de N_2O (B. Gómez et al., 2017). En efecto, Illarze et al. (2018), determinaron que las emisiones de N_2O en cultivos de arroz estaban asociadas con altas entradas de MOS durante la etapa de madurez, cuando el suelo tiene altas concentraciones de N mineral, lo cual aumenta su pérdida por nitrificación y desnitrificación. La unión de esta práctica con la RC puede también disminuir los flujos de GEI a la vez que aumenta el contenido de MOS e incrementa diferentes SE. La rotación de cultivos determina que los nutrientes disponibles en el suelo por la cosecha de un producto pueden ser aprovechados por el siguiente cultivo, de tal manera que lograr la sincronía entre la disponibilidad y las necesidades nutricionales de las plantas es una tarea necesaria.

En cultivos de cereales se ha determinado que la reducción de emisiones de N_2O y CO_2 dependen de la RC (maíz-soya) y de la época de año. Es en primavera cuando se presentan las mayores emisiones de N_2O , en tanto que las de CO_2 se incrementan en verano (Behnke et al., 2018). Por esta razón, las rotaciones de cultivos y la aplicación de EO se debe hacer considerando factores ambientales como la temperatura, la humedad y las características físicas de los suelos, específicamente su textura y porosidad. En este contexto, la rotación entre maíz y soya reduce aproximadamente el 35% de emisiones de N_2O , al igual que las emisiones de CO_2 (Behnke et al., 2018). Adicionalmente, el manejo de monocultivos sin rotación induce a mayores emisiones de N_2O mediante procesos biológicos (Illarze et al., 2018), lo que además reduce la capacidad del suelo para mantener el COS ya que se inhiben los procesos de metanotrofia. También, la integración de la RC con el MR aumenta los depósitos y la estabilización del COS a incrementar la capacidad de secuestro del carbono. A largo plazo (mayor a 5 años), la RC con leguminas y MR presentan mecanismos muy eficientes por las mayores tasas de secuestro de C y la estabilización de la estructura de los macroagregados (Krishna et al., 2019).

Según Valkama et al. (2020) las prácticas de agricultura de conservación inducen el secuestro de C y su tasa aumenta cuando se incorpora al sistema CC. Las tasas de secuestro de C de aproximadamente $0.77 \text{ t C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ pueden ascender cuando se implementan PA como los CC y la labranza cero (Mitchell et al., 2017). Además, los CC en el largo plazo (después de 5 años), no sólo incrementan el stock de COS, sino que además reducen las emisiones de CO_2 (Novara et al., 2019). Así mismo, la tasa de secuestro en los CC está vinculada al efecto que desempeña esta práctica sobre la entrada de C y la disminución de la pérdida de C a la atmósfera en forma gaseosa. Las PA de L0, aporte de EO, MR y RC previenen la erosión y la pérdida de nutrientes ya que, mantiene al suelo cubierto, por tanto, lo protege de situaciones como la escorrentía lo que se refleja en SE relacionados con la fertilidad de los suelos, la dinámica del COS y la disminución de las emisiones de GEI suelo-atmósfera. De acuerdo con Behnke y Villamil (2019), cuando los CC son incorporados ya sea en rotación o en un sistema convencional, absorben los nutrientes como el NO_3 para su desarrollo y evitan las pérdidas por lixiviación (nitrificación) o emisión (desnitrificación). También la labranza juega un rol fundamental en las emisiones de GEI, el rompimiento de los agregados, el volteo de los suelos expone el COS lo que se refleja en emisiones.

La L0 tiene un alto potencial para reducir las emisiones con respecto a la labranza convencional o mecanizada. Según Langeroodi et al. (2019), la L0 reduce los flujos de N_2O y CO_2 con respecto al manejo y preparación de los suelos de manera convencional. La LC promueve altas emisiones de CO_2 ($5.79 \text{ Mg } CO_2\text{-C ha}^{-1}$) en comparación con la L0 ($4.5 \text{ Mg } CO_2\text{-C ha}^{-1}$). Como se describió con anterioridad, la LC rompe y desestabiliza los agregados y el COS queda expuesto a las condiciones del medio y por acción microbiana inician procesos de mineralización del C que emite CO_2 (Horwath y Kuzyakov, 2018). Los macroagregados tienen mayor contenido de C en perfil de la capa superior del suelo lo cual promueve el secuestro de COS, no obstante, también es el que está más expuesto a la degradación por acciones de labranza. Por lo anterior, cuando otras PA se combinan con la L0 suelen ser más efectivas en la conservación de la dinámica del COS y la reducción de las emisiones de GEI. En efecto, la integración de PA que involucran MR y L0 en cultivos de maíz, resultan en macroagregados más estables y con alto contenido de COS en la capa superior y con reducciones de los flujos de CO_2 a la atmósfera, emitiendo máximo de $0.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en todo el ciclo del cultivo.

En resumen, la adopción de prácticas agroecológicas es un proceso basado en principios generales y experimentación, donde diferentes actores se unen para compartir conocimientos y encontrar soluciones adaptativas al contexto local y los desafíos agrícolas (McCune, Rosset, Salazar, Moreno y Morales, 2017; Mancini et al., 2021). Las investigaciones determinan que los sistemas agrícolas manejados bajo prácticas agroecológicas pueden proporcionar mejor seguridad alimentaria, calidad del suelo, resiliencia y calidad del hábitat para la biodiversidad, comparados con los cultivos convencionales (Chavarria et al., 2018; Garibaldi et al., 2017; Mancini et al., 2021) y adicionalmente incrementar la provisión de múltiples SE.

4. CONCLUSIONES

- Las prácticas agroecológicas incrementan la fertilidad y calidad del suelo a través del secuestro y almacenamiento de COS, así como la reducción de las emisiones de GEI. Además, fortalece el equilibrio dinámico de las comunidades que determina el control biológico natural de plagas.
- Los resultados evidencian el incremento de estudios en la temática en los últimos años. En la actualidad, las prácticas agroecológicas se determinan como una alternativa para disminuir los impactos potenciales de la agricultura sobre los recursos y la provisión de múltiples SE.

5. LITERATURA CITADA

- Accatino, F., Tonda, A., Dross, C., Léger, F. y Tichit, M. (2019). Trade-offs and synergies between livestock production and other ecosystem services. *Agricultural Systems*, 168, 58–72. doi: 10.1016/j.agsy.2018.08.002
- Aguilera, E., Guzmán, G. y Alonso, A. (2015). Greenhouse gas emissions from conventional and organic cropping systems in Spain. II. Fruit tree orchards. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 725–737. doi: 10.1007/s13593-014-0265-y
- Altieri, M. A. (2001). Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. En S. Sarandón (Ed), *Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable* (pp. 49-56). Buenos Aires, Argentina: Ediciones Científicas Americanas.
- Anastopoulos, I., Omirou, M., Stephanou, C., Oulas, A., Vasiliades, M., Efstathiou, A. y Ioannides, I. (2019). Valorization of agricultural wastes could improve soil fertility and mitigate soil direct N₂O emissions. *Journal of Environmental Management*, 250, 109389. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109389
- Armanda, D. T., Guinée, J. B. y Tukker, A. (2019). The second green revolution: Innovative urban agriculture's contribution to food security and sustainability – A review. *Global Food Security*, 22, 13–24. doi: 10.1016/j.gfs.2019.08.002
- Balvanera, J. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*, 21(1-2), 136-147.
- Baudron, F., Zaman-Allah, M. A., Chaipa, I., Chari, N. y Chinwada, P. (2019). Understanding the factors influencing fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* J.E. Smith) damage in African smallholder maize fields and quantifying its impact on yield. A case study in Eastern Zimbabwe. *Crop Protection*, 120, 141–150. doi: 10.1016/j.cropro.2019.01.028
- Behnke, G. D. y Villamil, M. B. (2019). Cover crop rotations affect greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA. *Field Crops Research*, 241, 107580. doi: 10.1016/j.fcr.2019.107580
- Behnke, G. D., Zuber, S. M., Pittelkow, C. M., Nafziger, E. D. y Villamil, M. B. (2018). Long-term crop rotation and tillage effects on soil greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 261, 62–70. doi: 10.1016/j.agee.2018.03.007
- Bommarco, R., Kleijn, D. y Potts, S.G., (2013). Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in ecology & evolution*, 28(4), 230–238. doi: 10.1016/j.tree.2012.10.012
- Bowers, C., Toews, M., Liu, Y. y Schmidt, J. M. (2019). Cover crops improve early season natural enemy recruitment and pest management in cotton production. *Biological Control*, 141, 104149. doi: 10.1016/j.biocontrol.2019.104149
- Büchi, L., Wendling, M., Amossé, C., Necpalova, M. y Charles, R. (2018). Agriculture, Ecosystems and Environment Importance of cover crops in alleviating negative effects of

- reduced soil tillage and promoting soil fertility in a winter wheat cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 256, 92–104. doi: 10.1016/j.agee.2018.01.005
- Calzolari, C., Ungaro, F., Filippi, N., Guermandi, M., Malucelli, F., Marchi, N., Staffilani, F. y Tarocco, P. (2016). A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geoderma*, 261, 190–203. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.07.013
- Chavarria, D.N. Pérez-Brandan, C., Serri, D.L., Meriles, J.M., Restovich, S.B., Andriulo, A.E., Jacquelin, L. y Vargas-Gil, S. (2018). Response of soil microbial communities to agroecological versus conventional systems of extensive agriculture. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 264, 1–8. doi: 10.1016/j.agee.2018.05.008
- Chen, H., Mothapo, N. y Shi, W. (2014). Soil Moisture and pH Control Relative Contributions of Fungi and Bacteria to N₂O Production. *Microbial Ecology*, 69(1), 180–191. doi: 10.1007/s00248-014-0488-0
- Chen, W., Ye, X., Li, J., Fan, X., Liu, Q. y Dong, W. (2019). Analyzing requisition – compensation balance of farmland policy in China through telecoupling: A case study in the middle reaches of Yangtze River Urban Agglomerations. *Land Use Policy*, 83, 134–146. doi: 10.1016/j.landusepol.2019.01.031
- Contino, Y., Iglesias, J., Toral, O., Blanco, J., González, M., Caballero, R. y Perera, E. (2018). Adopción de nuevas prácticas agroecológicas en tres unidades básicas de producción cooperativa. *Pastos y Forrajes*, 41(1), 56-63. Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S086403942018000100008&lng=es&tlng=pt.
- Costanza, R., dArge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Oneill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. y van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. doi: 10.1016/S0921-8009(98)00020-2
- Cotler, H., Martínez, M. y Etchevers, J. D. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y políticas públicas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 125-138.
- Davis, A. S., Hill, J. D., Chase, C. A., Johanns, A. M. y Liebman, M. (2012). Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health. *PLOS ONE*, 7(10), 1–8. doi: 10.1371/journal.pone.0047149
- Dendoncker, N., Boeraeve, F., Crouzat, E., Dufrêne, M., König, A. y Barnaud, C. (2018). How can integrated valuation of ecosystem services help understanding and steering agroecological transitions? *Ecology and Society*, 23(1). doi: 10.5751/ES-09843-230112
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A. y Grêt-Regamey, A. (2018). Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94, 151–169. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.06.052
- Ekroos, J., Olsson, O., Rundlöf, M., Wätzold, F. y Smith, H. G. (2014). Optimizing agri-environment schemes for biodiversity, ecosystem services or both? *Biological Conservation*, 172, 65–71. doi: 10.1016/j.bioccon.2014.02.013

- Farooq, M., Jabran, K., Cheema, Z. A., Wahid, A. y Siddique, K. H. (2011). The role of allelopathy in agricultural pest management. *Pest Management Science*, 67(5), 493–506. doi: 10.1002/ps.2091
- Franco-Luesma, S., Cavero, J., Plaza-Bonilla, D., Cantero-Martínez, C., Arrúe, J. L. y Álvaro-Fuentes, J. (2020). Tillage and irrigation system effects on soil carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) emissions in a maize monoculture under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 196, 104488. doi: 10.1016/j.still.2019.104488
- Fuentes, M., Hidalgo, C., Etchevers, J., de León, F., Guerrero, A., Dendooven, L., Verhulst, N. y Govaerts, B. (2012). Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions. *Plant and Soil*, 355(1–2), 183–197. doi: 10.1007/s11104-011-1092-4
- Fukase, E. y Martin, W. (2020). Economic growth, convergence, and world food demand and supply. *World Development*, 132, 104954. doi: 10.1016/j.worlddev.2020.10 4954
- Garibaldi, L.A., Gemmill-Herren, B., D’Annolfo, R., Graeub, B.E., Cunningham, S.A. y Breeze, T.D. (2017). Farming approaches for greater biodiversity, livelihoods, and food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 32, 68–80. doi: 10.1016/j. tree.2016.10.001
- Gómez, B., Magid, J. y Jensen, L. S. (2017). Nitrogen turnover, crop use efficiency and soil fertility in a long-term field experiment amended with different qualities of urban and agricultural waste. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 240, 300–313. doi: 10.1016/j.agee.2017. 01.030
- Gómez, N., Villagra, K. y Solórzano, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 170. doi: 10.18845/tm.v31i1.3506
- Goss, M. J., Carvalho, M. y Brito, I. (2017). Diversity in Arbuscular Mycorrhizal Fungi. In *Functional Diversity of Mycorrhiza and Sustainable Agriculture* (3rd ed., pp. 59–79). doi: 10.1016/b978-0-12-804244-1.00004-6
- Guillemot, J., le Maire, G., Munishamappa, M., Charbonnier, F. y Vaast, P. (2018). Native coffee agroforestry in the Western Ghats of India maintains higher carbon storage and tree diversity compared to exotic agroforestry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265, 461–469. doi: 10.1016/j.agee.2018.06.002
- Haines, R. y Potschin, M. (2018). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 Guidance on the Application of the Revised Structure. Retrieved from <https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2018/01/Guidance-V51-01012018.pdf>
- Harrison, R. D., Thierfelder, C., Baudron, F., Chinwada, P., Midega, C., Scha, U. y van den Berg, J. (2019). Agro-ecological options for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* JE Smith) management: Providing low-cost, smallholder friendly solutions to an invasive pest. *Journal of Environmental Management*, 243, 318–330. doi: 10.1016/j.jenvman.2019. 05.011
- He, J. Z., Shen, J. P., Zhang, L. M., Zhu, Y. G., Zheng, Y. M., Xu, M. G. y Di, H. (2007). Quantitative analyses of the abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea of a Chinese upland red soil under long-term fertilization

- practices. *Environmental Microbiology*, 9(9), 2364–2374. doi: 10.1111/j.1462-2920.2007.01358.x
- Horwath, W. R. y Kuzyakov, Y. (2018). The Potential for Soils to Mitigate Climate Change through Carbon Sequestration. In *Climate Change Impacts on Soil Processes and Ecosystem Properties* (pp. 61–92). doi: 10.1016/b978-0-444-63865-6.00003-x
- Illarze, G., del Pino, A., Riccetto, S. y Irisarri, P. (2018). Nitrous oxide emission, nitrification, denitrification and nitrogen mineralization during rice growing season in 2 soils from Uruguay. *Revista Argentina de Microbiología*, 50(1), 97–104. doi: 10.1016 /j.ram.2017.05.004
- Jabran, K., Mahajan, G., Sardana, V. y Chauhan, B. S. (2015). Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Protection*, 72, 57–65. doi: 10.1016/j. cropro.2015.03.004
- Julca, A., Meneses, L., Blas, R. y Bello, S. (2006). La Materia Orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49–61. doi: 10.4067/s0718-3429200600100009
- Kang, S. W., Seo, D. C., Kim, S. Y. y Cho, J. S. (2020). Utilization of liquid pig manure for resource cycling agriculture in rice–green manure crop rotation in South Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(5). doi: 10.1007/s10661-020-08289-z
- Khalil, H. M. M., Ahmed, E., Allam, N. y Dawood, M. F. A. (2019). Efficacy of arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic strain *Epicoccum nigrum* ASU11 as biocontrol agents against blackleg disease of potato caused by bacterial strain *Pectobacterium carotovora* subsp. *atrosepticum* PHY7. *Biological Control*, 134, 103–113. doi: 10.1016/j.biocontrol.2019.03.005
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K. y Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685–701. doi: 10.1098/rstb.2007.2178
- Krishna, K., Prasad, C., Singh, U., Sekhar, C., Kumar, N., Shankar, S. y Pratap, N. (2019). Diversification of maize-wheat cropping system with legumes and integrated nutrient management increases soil aggregation and carbon sequestration. *Geoderma*, 353, 308–319. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.06.039
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222. doi: 10.1002/fes3.96
- Landis, D. A. (2017). Designing agricultural landscapes for biodiversity-based ecosystem services. *Basic and Applied Ecology*, 18, 1–12. doi: 10.1016/j.baae.2016.07.005
- Langeroodi, A., Osipitan, A. y Radicetti, E. (2019). Benefits of sustainable management practices on mitigating greenhouse gas emissions in soybean crop (*Glycine max*). *Science of the Total Environment*, 660, 1593–1601. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.074
- Larney, F. J., Li, L., Janzen, H. H., Angers, D. A. y Olson, B. M. (2016). Soil quality attributes, soil resilience, and legacy effects following topsoil removal and one-time amendments. *Canadian Journal of Soil Science*, 96 (2), 177–190. doi: 10.1139/cjss-2015-0089
- Leijster, V. De, João, M., Wassen, M. J., Ramos-font, M. E., Belén, A., Díaz, M., Staal, M. y Verweij, P. A. (2019). Agroecological management improves ecosystem services in

- almond orchards within one year. *Ecosystem Services*, 38(January), 100948. doi: 10.1016/j.ecoser.2019.100948
- Li, T., Zhang, Y., Bei, S., Li, X., Reinsch, S. y Zhang, H. (2020). Catena Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates. *Catena*, 194(May), 104739. doi: 10.1016/j.catena.2020.104739
- Lind, L., Hasselquist, E. M. y Laudon, H. (2019). Towards ecologically functional riparian zones: A meta-analysis to develop guidelines for protecting ecosystem functions and biodiversity in agricultural landscapes. *Journal of environmental management*, 249, 109391. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109391
- Mccune, N., Rosset, P.M., Salazar, T.C., Moreno, A.S. y Morales, H. (2017). Mediated territoriality: rural workers and the efforts to scale out agroecology in Nicaragua. *The journal of Peasant Studies*, 44(2), 354–376. doi: 10.1080/03066150. 2016.1233 868
- Mancini, H., Bianchi, F. J. J. A., Maria, I. y Tiftonell, P. (2021). Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 305, 107171. doi: 10.1016/j.agee.2020.107171
- Martínez, H., Fuentes, E. y Acevedo, H. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68–96. doi: 10.4067/S0718-27912008000100006
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and human well-being: current state and trends. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, District of Columbia, USA.
- Mitchell, J. P., Shrestha, A., Mathesius, K., Scow, K. M., Southard, R. J., Haney, R. L., Schmidt, R., Munk, D. S. y Horwath, W. R. (2017). Soil & Tillage Research Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA. *Soil & Tillage Research*, 165, 325–335. doi: 10.1016/j.still. 2016.09.001
- Nicholls, C. I. (2008). Bases agroecológicas para diseñar e implementar una estrategia de manejo de hábitat para el control biológico de plagas. *Agroecología*, 1, 37–48.
- Novara, A., Minacapilli, M., Santoro, A., Rodrigo-comino, J., Carrubba, A., Sarno, M., Venezia, G. y Gristina, L. (2019). Science of the Total Environment Real cover crops contribution to soil organic carbon sequestration in sloping vineyard. *Science of the Total Environment*, 652, 300–306. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.247
- Nyamwasa, I., Zhang, S., Sun, X., Yin, J., Li, X., Qin, J., Li, J. y Li, K. (2020). Transition challenge to organic agriculture: A course for advancing belowground insect pest management. *Applied Soil Ecology*, 148, 103476. doi: 10.1016/j.apsoil.2019.103476
- Modak, K., Biswas, D. R., Ghosh, A., Pramanik, P., Das, T. K., Das, S., Kumar, S., Krishnan, P. y Bhattacharyya, R. (2020). Zero tillage and residue retention impact on soil aggregation and carbon stabilization within aggregates in subtropical India. *Soil and Tillage Research*, 202, 104649. doi: 10.1016/j.still.2020.104649

- Oechaiyaphum, K., Ullah, H., Shrestha, R. P. y Datta, A. (2020). Impact of long-term agricultural management practices on soil organic carbon and soil fertility of paddy fields in Northeastern Thailand. *Geoderma Regional*, 22, e00307. doi: 10.1016/j.geodrs. 2020.e00307
- Ondrasek, G., Bakić Begić, H., Zovko, M., Filipović, L., Meriño-Gergichevich, C., Savić, R. y Rengel, Z. (2019). Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. *Science of the Total Environment*, 658, 1559–1573. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.243
- Palma, L., Ceballos, S. J., Johnson, P. C., Niemeier, D., Pitesky, M. y VanderGheynst, J. S. (2018). Cultivation of black soldier fly larvae on almond byproducts impacts of aeration and moisture on larvae growth and composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(15), 5893–5900. doi: 10.1002/jsfa.9252
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L. y Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science and Policy*, 54, 438–447. doi: 10.1016/j.envsci. 2015.08.012
- Pangesti, N., Weldegergis, B. T., Langendorf, B., van Loon, J.J., Dicke, M. y Pineda, A. (2015). Rhizobacterial colonization of roots modulates plant volatile emission and enhances the attraction of a parasitoid wasp to host - infested plants. *Oecologia*, 178(4), 1169–1180. doi: 10.1007/s00442-015-3277-7
- Piazza, G., Ercoli, L., Nuti, M. y Pellegrino, E. (2019). Interaction between Conservation Tillage and Nitrogen Fertilization Shapes Prokaryotic and Fungal Diversity at Different Soil Depths: Evidence from a 23-Year Field Experiment in the Mediterranean Area. *Frontiers in microbiology*, 10, 2047. doi: 10.3389/fmicb.2019.02047
- Pineda, A., Kaplan, I. y Bezemer, T. M. (2017). Steering Soil Microbiomes to Suppress Aboveground Insect Pests. *Trends in Plant Science*, 22(9), 770–778. doi: 10.1016/j.tplants.2017.07.002
- Pingali, P. L. (2012). Green revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(31), 12302–12308. doi: 10.1073/pnas.0912953109
- Qi, G., Chen, S., Ke, L., Ma, G. y Zhao, X. (2020). Cover crops restore declining soil properties and suppress bacterial wilt by regulating rhizosphere bacterial communities and improving soil nutrient contents. *Microbiological Research*, 238, 126505. doi: 10.1016/j.micres.2020.126505
- Recanati, F. y Guariso, G. (2018). An optimization model for the planning of agroecosystems: Trading off socio-economic feasibility and biodiversity. *Ecological Engineering*, 117, 194–204. doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.03.010
- Rivers, A., Barbercheck, M., Govaerts, B. y Verhulst, N. (2016). Conservation agriculture affects arthropod community composition in a rainfed maize – wheat system in central Mexico. *Applied Soil Ecology*, 100, 81–90. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.12.004

- Rowen, E. K., Regan, K. H., Barbercheck, M. E. y Tooker, J. F. (2020). Is tillage beneficial or detrimental for insect and slug management? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 294, 106849. doi: 10.1016/j.agee.2020.106849
- Rowen, E., Tooker, J. F. y Blubaugh, C. K. (2019). Managing fertility with animal waste to promote arthropod pest suppression. *Biological Control*, 134, 130–140. doi: 10.1016/j.biocontrol.2019.04.012
- Ruiz, C.A., Hurtado, S.L., Carrillo, Y.P. y Parrado, C.A. (2019). Lo que sabemos y no sabemos sobre los sistemas agroforestales tropicales y la provisión de múltiples servicios ecosistémicos. Una revisión. *Ecosistemas* 28(3), 26-35. doi: 10.7818/ECOS.1697
- Rusch, A., Bommarco, R., Jonsson, M., Smith, H. G. y Ekbom, B. (2013). Flow and stability of natural pest control services depend on complexity and crop rotation at the landscape scale. *Journal of Applied Ecology*, 50(2), 345–354. doi: 10.1111/1365-2664.12055
- Santamaría, J., Parrado, C. A. y López, L. (2018). Soil microbial community structure and diversity in cut flower cultures under conventional and ecological management. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 42, 1–11. doi: 10.1590/18069657rbcs20170016
- Scheiner, C. y Martin, E. A. (2020). Spatiotemporal changes in landscape crop composition differently affect density and seasonal variability of pests, parasitoids and biological pest control in cabbage. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 301, 107051. doi: 10.1016/j.agee.2020.107051
- Selosse, M. A., Bessis, A. y Pozo, M. J. (2014). Microbial priming of plant and animal immunity: Symbionts as developmental signals. *Trends in Microbiology*, 22(11), 607–613. doi: 10.1016/j.tim.2014.07.003
- Smith, S. y Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. Oxford: Elsevier Science (Mycorrhizal Symbiosis).
- Smith, A., Snapp, S., Dimes, J., Gwenambira, C. y Chikowo, R. (2016). Doubled-up legume rotations improve soil fertility and maintain productivity under variable conditions in maize-based cropping systems in Malawi. *Agricultural Systems*, 145, 139–149. doi: 10.1016/j.agsy.2016.03.008
- Sofo, A., Palese, A. M., Casacchia, T. y Xiloyannis, C. (2014). Sustainable Soil Management in Olive Orchards: Effects on Telluric Microorganisms. *Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance (Second Edition, Vol. 2, pp. 471–483)*. Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-800875-1.00020-X
- Stewart-Wade, S. M. (2020). Efficacy of organic amendments used in containerized plant production: Part 1 – Compost-based amendments. *Scientia Horticulturae*, 266, 108856. doi: 10.1016/j.scienta.2019.108856
- Tanaka, H., Katsuta, A., Toyota, K. y Sawada, K. (2013). Soil Fertility and Soil Microorganisms. In *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems* (pp. 107–142). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-404609-2.00005-2
- Torabian, S., Farhangi-abriz, S. y Denton, M. D. (2019). Do tillage systems influence nitrogen fixation in legumes? A review. *Soil & Tillage Research*, 185, 113–121. doi: 10.1016/j.still.2018.09.006

- Urta, J., Mijangos, I., Epelde, L., Alkorta, I. y Garbisu, C. (2020). Impact of the application of commercial and farm-made fermented liquid organic amendments on corn yield and soil quality. *Applied Soil Ecology*, 153, 103643. doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103643
- Uzoh, I. M., Igwe, C. A., Okebalama, C. B. y Babalola, O. O. (2019). Legume-maize rotation effect on maize productivity and soil fertility parameters under selected agronomic practices in a sandy loam soil. *Scientific reports*, 9(1), 8539. doi: 10.1038/s 41598-019-43679-5
- Valkama, E., Kunyupiyeva, G., Zhapayev, R., Karabayev, M., Zhusupbekov, E., Perego, A., Schillaci, C., Sacco, D., Moretti, B., Grignani, C. y Acutis, M. (2020). Can conservation agriculture increase soil carbon sequestration? A modelling approach. *Geoderma*, 369, 114298. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114298
- Vázquez, E., Benito, M., Espejo, R. y Teutscherova, N. (2020). Soil & Tillage Research No-tillage and liming increase the root mycorrhizal colonization, plant biomass and N content of a mixed oat and vetch crop. *Soil & Tillage Research*, 200, 104623. doi: 10.1016 /j.still.2020.104623
- Wang, J., Wang, K., Wang, X., Ai, Y., Zhang, Y. y Yu, J. (2018). Carbon sequestration and yields with long-term use of inorganic fertilizers and organic manure in a six-crop rotation system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 111(1), 87–98. doi: 10.1007/s10705-018-9920-z
- Wu, Z., Zhang, X., Dong, Y., Li, B. y Xiong, Z. (2019). Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: six-year field observation and meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278, 107625. doi: 10.1016/j. agrformet.2 019.107625
- Xiang, H., Zhang, Y., Wei, H. y Zhang, J. (2018). Soil properties and carbon and nitrogen pools in a young hillside longan orchard after the introduction of leguminous plants and residues. *Peer J*, 1–18. doi: 10.7717/peerj.5536
- Yang, W., Feng, G., Miles, D., Gao, L., Jia, Y., Li, C. y Qu, Z. (2020). Impact of biochar on greenhouse gas emissions and soil carbon sequestration in corn grown under drip irrigation with mulching. *Science of the Total Environment*, 729(306), 138752. doi: 10. 1016/j.s citotenv.2020.138752
- Yu, H., Zha, T., Zhang, X. y Ma, L. (2019). Science of the Total Environment Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 693, 133632. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133632
- Zhong, W., Gu, T., Wang, W., Zhang, B., Lin, X., Huang, Q. y Shen, W. (2010). The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity. *Plant and Soil*, 326(1), 511–522. doi: 10.1007/s11104-009-9988-y