

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Cultivos de cobertura: beneficios para el suelo y el ambiente

Kenneth Segura-Hidalgo¹ 

1. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, Montes de Oca, San José, Costa Rica; kenneth.segurahidalgo@ucr.ac.cr

Recibido 29-IX-2025 • Corregido 10-II-2026 • Aceptado 16-II-2026

DOI: <https://doi.org/10.22458/urj.v18i1.6100>

ABSTRACT. “Cover Crops: Benefits for Soil and the Environment (Review)”. **Introduction:** One of the main concerns in current agricultural systems is the decline in soil quality and the deterioration of ecosystem services, highlighting the need to recover ancestral agricultural practices such as cover crops, which combine improvements in production systems with climate change mitigation. **Methods:** This literature review analyzes 111 publications from 2010 to 2025, examining the effects of cover crops across four thematic areas: (1) soil conservation and physical properties, (2) organic matter and nutrient inputs, (3) soil ecology, and (4) climate change mitigation. **Results:** Cover crops enhance soil structural stability, increase porosity, and promote greater water infiltration, thereby reducing water erosion. They also contribute biomass and nutrients that enrich organic matter, improve fertility, and strengthen moisture retention, even under hot conditions. Ecologically, they diversify soil biota, stimulate microbial and macrofaunal communities, and promote beneficial associations such as mycorrhizae. They represent a valuable strategy against climate change by enhancing carbon sequestration and reducing reflected solar radiation. However, living cover crops remain underutilized, mainly due to limited research on their integration into conventional agricultural management plans. **Conclusion:** Current literature indicates that cover crops are a key alternative for addressing agricultural challenges, helping to curb soil degradation and serving as a natural climate solution through carbon sequestration and radiation reduction. Nevertheless, their adoption remains limited, hindering the alignment of agricultural production with resource conservation and the development of more resilient and sustainable agroecosystems.

Keywords: Sustainable agriculture, soil, conservation, carbon, microbiota, agroecology.

RESUMEN. Introducción: una de las principales preocupaciones de los sistemas agrícolas actuales es la pérdida de la calidad de los suelos y el deterioro de sus servicios ecosistémicos, conviniendo rescatar el legado agrícola ancestral, como los cultivos de cobertura de suelo, los cuales combinan una mejora en el sistema de producción agrícola y la mitigación de los efectos del cambio climático. **Métodos:** esta revisión de literatura abarca el análisis de 111 publicaciones entre los años 2010 y 2025 y analiza los efectos de los cultivos de cobertura en cuatro ejes temáticos 1. Conservación y propiedades físicas del suelo, 2. Aporte de materia orgánica y nutrientes, 3. Ecología edáfica y 4. Mitigación del cambio climático. **Resultados:** las coberturas vegetales favorecen la estabilidad estructural del suelo, incrementan la porosidad y promueven una mayor infiltración de agua, reduciendo la erosión hídrica. Asimismo, aportan biomasa y nutrientes que enriquecen la materia orgánica, mejoran la fertilidad y fortalecen la capacidad de retener humedad, incluso en condiciones cálidas. Desde el punto de vista ecológico, diversifican la biota edáfica, estimulan comunidades microbianas y de macrofauna, y promueven asociaciones benéficas como las micorrizas. Representan una estrategia de valía contra el cambio climático, al favorecer el secuestro de carbono y disminuir la radiación solar reflejada. Sin embargo, las coberturas vivas son una práctica subutilizada y su principal limitación es la falta de investigación en su acople con planes de manejo agrícola tradicionales. **Conclusión:** la literatura actual indica que los cultivos de cobertura son una alternativa clave para enfrentar problemas agrícolas, ya que ayudan a frenar la degradación del suelo y contribuyen como solución climática natural mediante el secuestro de carbono y la reducción de radiación. No obstante, su uso sigue siendo limitado, lo que dificulta

compatibilizar la producción agrícola con la conservación de los recursos y el desarrollo de agroecosistemas más resilientes y sostenibles.

Palabras clave: Agricultura sostenible, suelo, conservación, carbono, microbiota, agroecología.

La degradación de los suelos como resultado de décadas de cultivo agrícola intensivo se ha convertido en uno de los principales desafíos de la agricultura moderna, puesto que impacta directamente la seguridad alimentaria y la estabilidad de los ecosistemas, para mitigar estos efectos, los cultivos de cobertura resurgen como una práctica agronómica clave que mejoran la calidad física, química y biológica del suelo (Final & Cristini, 2023; Pelchor Chicaiza & De la Fuente de Val, 2025).

En general, los podemos definir como una plantación secundaria dentro de un cultivo principal, ya sea en paralelo o intercalados al finalizar el ciclo de cosecha y cuyo objetivo es mantener las relaciones bióticas suelo-planta hasta el siguiente ciclo de cultivo, además de proteger al suelo de condiciones climáticas desfavorables y, a la vez, aprovechar los lixiviados radiculares ricos en nutrientes que estimulan a la microbiota edáfica (Hudek et al., 2022). En este aspecto, destacan el uso de plantas como trébol, ajonjolí, rábano, leguminosas y pastos (Bacq-Labreuil et al., 2019; Fernando & Shrestha, 2023; Griffiths et al., 2022).

Diversos estudios han documentado un impacto positivo en variables como la retención de humedad, el incremento del carbono orgánico, la diversificación de la riqueza microbiana, la reducción de la erosión tanto hídrica como eólica y su efecto en la reducción sobre gases de efecto invernadero (Dagatti et al., 2024; Hudek et al., 2022; Quijano et al., 2021; Scaglione et al., 2023; Schön et al., 2024).

La selección de especies debe ser estratégica, alineada con los objetivos productivos y las condiciones locales, buscando equilibrar especies que favorecen las interacciones microbiológicas con especies de sistema radicular desarrollado que mejoran la estructura del suelo. (dos Santos Cordeiro et al., 2021).

En cualquier caso, la efectividad de las coberturas depende de un ajuste preciso al contexto regional, en el cual consideremos el tipo de suelo, el clima y los recursos disponibles (Abdalla et al., 2019), por lo tanto, apostar por una mezcla de especies es una opción con un alto potencial para favorecer la diversidad de la micro y macro fauna del suelo (Fiorini et al., 2022) lo que me lleva a plantear que contribuye a estabilizar los sistemas agrícolas (Pinto et al., 2017; Schmidt et al., 2018; Sinaluisa et al., 2022).

Con esta revisión pretendo revalorizar los beneficios de los cultivos de cobertura reportados por la literatura científica reciente sobre aspectos como las propiedades físicas del suelo, la conservación de nutrientes y agua, la ecología edáfica y su papel en la mitigación del cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación corresponde a una revisión bibliográfica narrativa con un enfoque técnico que busca recopilar, organizar y analizar la evidencia científica publicada entre 2010 y 2025 relacionada con los efectos de los cultivos de cobertura en:

1. Conservación y propiedades físicas del suelo
2. Aporte de materia orgánica y nutrientes
3. Ecología edáfica



4. Mitigación del cambio climático.

La búsqueda de literatura la realicé en bases de datos académicas especializadas y de acceso abierto, incluyendo Scopus, Web of Science, Google Scholar y SciELO. Utilicé combinaciones de palabras clave en español e inglés, tales como *cover crops*, *soil organic carbon*, *soil erosion*, *soil ecology*, *soil moisture*, *sustainable agriculture* y sus equivalentes en español: cultivos de cobertura, carbono orgánico del suelo, erosión del suelo, ecología edáfica, humedad del suelo, agricultura sostenible y se revisaron alrededor de 111 artículos principalmente de revistas indexadas.

Establecí que los criterios de inclusión fueran:

1. Artículos de investigación y revisiones publicadas en revistas científicas
2. Estudios desarrollados en sistemas agrícolas
3. Publicaciones comprendidas entre 2010 y 2025.

Y mis criterios de exclusión incluyeron:

1. Literatura gris no arbitrada (tesis)
2. Investigaciones realizadas antes del año 2010
3. Trabajos no enfocados en cultivos de cobertura o en los ejes temáticos definidos

DISCUSIÓN

La erosión del suelo es un fenómeno que se puede vincular con la seguridad alimentaria de algunas zonas geográficas y hasta como un indicador socioeconómico en la medida en que interfiere con la base alimenticia de la población (Nnanguma, 2026), en este contexto, los cultivos de cobertura vienen a ser una herramienta eficaz en la mejora y conservación de las propiedades físicas, especialmente en suelos degradados en donde actúan como una barrera que aminora la erosión causada por el agua al disminuir la velocidad del impacto de las gotas de lluvia (Capurro & Montico, 2022; Uhaldegaray et al., 2024)

Las coberturas de frijol lograron reducir el arrastre de sedimentos de $0,468\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (control) a $0,154\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en suelos agrícolas de textura arcillosa y con una pendiente del 8%, lo que significa una reducción del 32,9%, por otra parte, con una pendiente del 20% la reducción fue de 1,145 a $0,489\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ lo que representa una disminución del 42,7% en el arrastre de material edáfico (Mohammed et al., 2021). Este efecto se debe a la presión que ejerce el sistema radicular sobre las partículas del suelo, protegiéndolo contra la erosión (Bejar-Pulido et al., 2024), en especial, las especies con mayor abundancia de raíces finas (De Baets et al., 2011).

Aunque los efectos pueden depender del tipo de suelo y de sus características particulares, los ensayos realizados en suelos franco-arenosos muestran que la soja como cobertura promueve un aumento de la estabilidad estructural mediante el incremento del 3,1% en la proporción de poros $<10\mu\text{m}$ durante un segundo ciclo de cosecha (Varela et al., 2011), dichos poros se encuentran vinculados a la capacidad de retención de agua disponible para las plantas (de Lima et al., 2022). De la misma manera, es notable el efecto de la rotación soja-maíz en el aumento de la cantidad macroporos ligados a un menor índice de compactación, una mayor conductividad hidráulica y espacio poroso (Restovich et al., 2011).

Esta última es una propiedad clave para los procesos biológicos de los suelos agrícolas, dado que determina la capacidad de captar, almacenar y transportar agua en el perfil edáfico y por ello se considera como un indicador fundamental de la calidad del suelo (González-Barrios et al., 2011).



Los métodos convencionales para mejorar esta propiedad en campos agrícolas se basan en el movimiento del suelo mediante maquinaria con una consecuente destrucción de la estructura; sin embargo, permite una mejora de la conductividad hidráulica que resulta ser todo lo contrario a muy corto plazo, ocurre bajo una cobertura vegetal en donde el sistema radicular permanente asegura el aumento de la porosidad y de la conducción del agua en el perfil del suelo, pero sus efectos los percibimos en el largo plazo (Haruna et al., 2018; Villagra-Mendoza et al., 2023).

La existencia de una cobertura viva permite mantener una temperatura de suelo estable o con menor variación en las capas superficiales durante el día y la noche, esto permite que se retenga más humedad, dado que el agua posee un alto valor del calor específico, esta absorbe gran parte del calor reduciendo así los cambios drásticos en la temperatura del suelo, muy notorios en suelos desnudos (Badía et al., 2017; Yaguache Ordóñez, 2022). Este punto es un factor determinante en la estabilización del carbono en el suelo debido a que, a mayor temperatura, se presenta una mayor pérdida de carbono debido a la estimulación de la actividad microbiana (Hartley et al., 2021) con un efecto directo sobre el ciclaje de nutrientes (Haque et al., 2024; Strickler, 2021).

En la conservación del carbono orgánico del suelo (COS) se destacan cambios positivos de hasta un 59,9% de COS en los primeros 5cm de suelo en parcelas cubiertas, en comparación con suelos desnudos (López-Vicente et al., 2021), con una capacidad de acumulación de carbono orgánico de hasta $0,55\text{Mg}\cdot\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ y una reducción de la erosión por lixiviación de hasta un 29,0% (Basche, Archontoulis et al., 2016).

En regiones con un paisaje tan variado como Costa Rica, los fuertes vientos generados durante el periodo de transición climática constituyen una importante causa de erosión eólica y representan un desafío adicional, debido a que estos vientos recorren valles y laderas a velocidades que en ocasiones superan los 100km/h, lo que ocasiona el arrastre de material mediante enormes nubes de polvo en terrenos recién preparados para la siembra (Artavia-Rodríguez et al., 2024), las cuales pueden movilizar toneladas de suelo con valores de erodabilidad de 0,30 hasta $4,27\text{kg}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2}$ en algunos lugares de Guanacaste (Salinas & Morales, 2014).

Estimaciones realizadas en Estados Unidos indican que el aumento del 1% en los cultivos de cobertura de los campos agrícolas podrían mitigar la pérdida de 42,534 toneladas de suelo, aunque son condiciones y suelos diferentes, el dato nos sirve como un indicador sobre la importancia de cubrir el suelo (Chen et al., 2022).

De igual forma, la arquitectura del follaje influye en la reducción de la cantidad de sedimentos arrastrados con el agua de escorrentía, por ejemplo, en suelos del orden entisol con un 2% de pendiente, el frijol como cobertura mostró una gran capacidad de atenuar la energía cinética de las gotas de lluvia, gracias a su hábito de crecimiento postrero e indeterminado, mientras que con cebada el efecto fue menor (Huerta-Olague et al., 2018). De esta manera, la biomasa aérea de las coberturas constituye una barrera física y biológica que disminuye la erosión hídrica y eólica, a la vez que mejoran la calidad edáfica a mediano y largo plazo (Muñoz & Monasterio, 2024).

En un bosque toda la biomasa producida es reciclada por el suelo y regresa al sistema, y eso genera un ciclo que permite al suelo mantener su dinamismo, de una forma análoga, los cultivos de cobertura enriquecen los reservorios de la materia orgánica del suelo (MOS), modulan la fertilidad, la estructura y la distribución del espacio poroso (Ren et al., 2025), además, representan un componente esencial para la estabilidad de los agregados debido a su efecto como un agente cementante (Martínez et al., 2020).

Tras 20 años de muestreos en diferentes cultivos, la tasa de cambio de $\text{COS}\cdot\text{año}^{-1}$ en el suelo fue de 0,031% en el cultivo de aguacate, de 0,043% en un pastizal y para el caso de la caña de azúcar se detectó una tendencia negativa en un rango de -0,003 a -0,062% en siete diferentes lugares que demuestran el patrón de comportamiento de estos diferentes cultivos en el cual, la caña de azúcar

parece tener un efecto negativo sobre el COS (Bojórquez Serrano et al., 2015).

En cuanto al aporte de nutrientes, las coberturas del tipo leguminosas destacan como fuente natural de nitrógeno mediante fijación biológica, cultivos como trébol (*Medicago hispida*) y vicia (*Vicia sativa* L.) pueden proveer entre 284,90 y 290,09kg·N·ha⁻¹, respectivamente, aún en condiciones de pendientes entre 5–25% (Quispe et al., 2021). Por su parte, las gramíneas como centeno (*Secale cereale* L.) y avena (*Avena sativa* L.) se especializan, además, en capturar nitratos residuales y evitar su lixiviación durante el barbecho, lo que contribuye al reciclaje de nutrientes, a la reducción de pérdidas en el perfil edáfico (Daryanto et al., 2018; Kaspar & Singer, 2011; Rimski-Korsakov & Lavado, 2021) y a disminuir la eutroficación debido a la contaminación por nitratos (Andén & Pizzolon, 2025).

También es notable el aporte de la materia orgánica proveniente de los grandes volúmenes de biomasa que se depositan en el suelo para mejorar la capacidad de retención de humedad, algunos datos indican una mejora de hasta un 34% (Capurro & Montico, 2022; MacHmuller et al., 2015; Úbeda Rivera & Delgado Dallatorre, 2018). Aún en zonas cálidas en donde otras plantas suelen considerarse competidoras por el agua para el cultivo principal, las coberturas pueden reducir la evaporación (Fernández et al., 2012; Strickler, 2021). Lo que genera un impacto positivo en el largo plazo de alrededor de 11% en la humedad a la capacidad de campo y de hasta un 22% en el agua disponible para las plantas tras siete años de estudio en el cual se permitió la estabilización del sistema (Basche, Kaspar, et al., 2016; Uhaldegaray et al., 2024) sin interferir en los rendimientos del cultivo principal (Ponce et al., 2020).

Cultivos como el rábano forrajero con una arquitectura radicular más gruesa permite abrir canales en el suelo que facilitan la exploración de las raíces hacia horizontes más profundos, mejorando el acceso a agua localizada (Wong et al., 2024). Esta especie puede desarrollarse en suelos compactados de hasta 50cm de profundidad, incluso con una resistencia a la penetración de 2,5MPa (Chen & Weil, 2010). Empero, es importante recalcar que existe un periodo de adaptación en el que los cultivos de cobertura podrían realmente ser competidores y disminuir el contenido de humedad del suelo debido a una etapa de adaptación en la cual, las plantas tratan de acarrear toda la humedad para su supervivencia, por lo tanto, es necesario aclarar que el agroecosistema debe entrar en equilibrio para acoger al máximo todos los beneficios (Kasper et al., 2022).

Una cobertura viva deposita una gran cantidad de exudados radiculares que estimulan una amplia gama de interacciones con la microbiota del suelo (Montenegro-Gómez et al., 2022). Estas interacciones son más diversas en cultivos rústicos, puesto que el mejoramiento y la manipulación genética de los cultivos comerciales orientados principalmente a la productividad han reducido en parte estas interacciones (Nerva et al., 2022). Los cultivos de cobertura, por su rusticidad, favorecen todos estos procesos, reactivando las conexiones con comunidades microbianas con las que han tenido un amplio contacto (Valdés et al., 2021).

Por lo tanto, el uso de especies autóctonas o naturalizadas representa una estrategia con gran potencial debido a las adaptaciones específicas a las condiciones locales, a la coevolución, la adaptación con el suelo y su biota (Adedayo & Olorunkosebi, 2025; Lyu et al., 2021) esta relación entre exudados radicales y comunidades microbianas representa un gran criterio de selección (Eckert et al., 2020; Schweitzer et al., 2014).

El efecto positivo sobre la biota está, por supuesto, estrechamente relacionado con el incremento de MOS y con una mayor porosidad que favorece condiciones aeróbicas en el perfil edáfico (Bach et al., 2018), lo que también da lugar al desarrollo de hongos micorrízico arbusculares (HMA), cuya actividad se asocia con la producción de glicoproteínas que refuerzan la estabilidad de los agregados y el secuestro de carbono (Gao et al., 2025). Prácticas de conservación en conjunto con un suelo cubierto han logrado aumentar la colonización micorrízica hasta en un 30%, en

distintos tipos de suelo y cultivos (Bowles et al., 2017) en el mediano y largo plazo, lo que subraya la necesidad de mantener una agricultura de conservación para consolidar cambios estables (Yu et al., 2022).

En general, los arreglos heterogéneos de plantas promueven una mayor diversidad de artrópodos e insectos benéficos en el suelo (Gómez et al., 2018), a la vez que incrementan la diversidad microbiana, disminuyen la proliferación de hongos patógenos y enriquecen los grupos funcionales (Vukicevich et al., 2016), mejorando así los aspectos citados anteriormente como la nutrición de los cultivos y la salud general del suelo (Farmaha et al., 2022; Thapa et al., 2021). La macrofauna también juega un rol esencial en este proceso porque influye en la estructura edáfica, contribuye a reciclar nutrientes, a incrementar la materia orgánica e incluso, suprimir la presencia de plagas. Por ello se le reconoce como un indicador sensible de la calidad del suelo frente al manejo agronómico (Morales-Rojas et al., 2021).

A nivel microbiano, los filos como Proteobacteria y Bacteroidetes se encuentran ligados como indicadores en suelos desnudos y con amplio uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados, mientras que filos como Acidobacteria y Cyanobacteria predominaron en suelos con mayor contenido de carbono y nitrógeno orgánico derivado de las cubiertas vegetales del suelo (Verzeaux et al., 2016), de esta manera, las comunidades microbianas pueden servir como un indicador de la calidad de suelo (Dowdeswell-Downey et al., 2023).

Antes de implementar un sistema de cobertura que va a modificar las comunidades microbianas, es recomendable realizar un análisis de suelo para determinar los grupos de hongos y bacterias dominantes para tener una idea acerca de cómo se van a mover los perfiles y lograr descartar hongos patógenos típicos como *Phytophthora sp* o *Fusarium sp*, ante todo es deseable tratar de conservar la microbiota local mediante la elaboración de té de compost o té de suelo con el fin de darle a las comunidades benéficas un impulso inicial para el establecimiento de un nuevo equilibrio biológico (Garg & Rakshit, 2024). Por otra parte, también es el momento ideal para introducir microorganismos como hongos micorrícicos arbusculares (Finney et al., 2017).

Como último punto y en un aspecto de interés actual, considero importante resaltar el papel de las coberturas como una herramienta de alto impacto en la lucha contra los efectos del cambio climático, puesto que inciden directamente sobre los ciclos biogeoquímicos del C y del N (Khan et al., 2024; Vidal Morant et al., 2026) y en el aumento de sus reservas en el suelo (Langelier et al., 2021; Seitz et al., 2022). Por tanto, esta práctica versátil se posiciona como de gran interés para implementar en la política pública como una estrategia orientada hacia la captura de carbono (Rakkar et al., 2025).

Esto es de especial relevancia en países que se han comprometido con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, como es el caso de Costa Rica, en donde el Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050 promueve una agricultura baja en carbono y resiliente (Ministerio de Ambiente y Energía, 2019). De este modo, el Programa Estado de la Nación del año 2024 indica que el sector agropecuario lidera las iniciativas en cuanto a estrategias para la mitigación del cambio climático (Programa Estado de la Nación, 2024). No obstante, el mismo informe del año 2025 indica que, frente a escenarios de cambio climático, la fragilidad del país ha aumentado e insta a que se tomen medidas concretas y constantes en el tiempo para sembrar beneficios a largo plazo (Programa Estado Nación, 2025).

El efecto de los cultivos de cobertura como una herramienta natural clave en la lucha contra el cambio climático se fundamenta en la preservación y el aumento de las reservas de carbono del suelo (Maqbool et al., 2025; Schön et al., 2024) en conjunto con una menor pérdida de nitrógeno al estabilizar los procesos relacionados con su ciclo biológico (Finney et al., 2016; Garland et al., 2021; Quintarelli et al., 2022). Los estudios europeos estiman que la siembra de coberturas vegetales

antes del establecimiento del maíz podría compensar hasta el 13% de las emisiones de carbono asociadas al sector agrícola (Schön et al., 2024), aunado a la captura de entre 7,6 a 12,1Tg·CO₂ eq·año⁻¹ que se prevé en Canadá, en donde se propone como una estrategia concreta sin afectación al cultivo de interés económico (Drever et al., 2021).

En el sector agro no se suele considerar la huella de carbono de los pesticidas que se utilizan en la producción; sin embargo, en esta categoría los herbicidas se llevan el valor más alto con un increíble 45% de contribución; para ponerlo en perspectiva, esto representa emisiones por un rango de $38,3 \times 10^5 \text{t} \cdot \text{CO}_2 \text{ eq}$ a $58,1 \times 10^5 \text{t} \cdot \text{CO}_2 \text{ eq}$ tanto en su producción como en su aplicación que, si bien, se diluye entre los productores, es un monto que no se puede desligar de la producción agrícola (Traware et al., 2025).

Como alternativa, en las plantaciones de cítricos el uso de leguminosas de cobertura ha resultado una estrategia efectiva en el combate contra las arvenses y, de paso, contribuye a mejorar la fertilidad del suelo y a nutrir la microbiota edáfica (Enríquez-Quiroz et al., 2025), similar a lo reportado en el área forestal en Costa Rica en cultivos de teca (*Tectona grandis* L.), en donde el uso de la leguminosa *Crotalaria juncea* resultó en una cobertura completa del suelo con una eficaz competencia contra arvenses (Guevara-Bonilla et al., 2021).

Por otra parte, la cobertura del suelo regula el balance energético superficial, debido a que modula la cantidad de irradiancia solar reflejada hacia la atmósfera denominada albedo y que se define como la relación entre la irradiancia reflejada y la incidente (Golroodbari & van Sark, 2022). Un albedo bajo provoca un aumento de la radiación neta y contribuye al calentamiento global, por el contrario, un albedo alto genera un efecto de enfriamiento (Kaye & Quemada, 2017).

El albedo es afectado por factores como la estacionalidad, de manera que los cultivos perennes tienen un albedo más alto que los anuales o factores como el manejo agronómico en el que las prácticas tradicionales de dejar el suelo descubierto generan un albedo más bajo en declive del balance energético superficial, lo que ocasiona una mayor captura de calor (Lei et al., 2024).

El aumento del albedo en un 4,17% como resultado directo del uso de cultivos de cobertura equivaldría a un efecto de mitigación de 3,16 MtCO₂ eq ·año⁻¹ en un horizonte temporal de 100 años (Carrer et al., 2018) y un potencial de enfriamiento de hasta -13,6W·m⁻² en cultivos de cereales como la avena (Sieber et al., 2022).

El objetivo es contrarrestar los efectos de prácticas agrícolas desvinculadas del funcionamiento biológico en los agroecosistemas como resultado de la necesidad de satisfacer la alta demanda global de alimentos y que, por lo tanto, alteran los ciclos naturales del carbono y del nitrógeno, provocando una acelerada degradación del recurso suelo (Acharya et al., 2024; Ponyane et al., 2025; Wang et al., 2025).

A pesar de que en los últimos años la creciente conciencia ambiental de los consumidores ha impulsado la transición a estrategias agrícolas más sostenibles y provocado la evolución gradual del sector agro (Narbona et al., 2023; Pinargote-Yeppez et al., 2024), uno de los principales y más grandes desafíos que enfrenta la adopción de estas prácticas agrícolas en un sistema productivo convencional bien establecido es la resistencia al cambio y esto se debe principalmente a la dificultad de acoplarlas a un plan de manejo agrícola aceptado que genera resultados a corto plazo (Luis Bernal Albendín, 2023).

En consecuencia, resulta imperativo el esfuerzo coordinado mediante política pública que coordine a centros de investigación, empresas y pequeños productores para reactivar la conciencia en la conservación del suelo (Abdalla et al., 2019) y enfrentar los desafíos en torno a la adopción y adaptación tanto en contextos regionales específicos como a empresas grandes cuyo sistema de control de arvenses se encuentran fuertemente ligado a un método químico. Igualmente, la toma de decisiones a nivel nacional debe de integrar la interacción con los diferentes cultivos de valor

económico, la protección de la seguridad alimentaria y los escenarios de cambio climático previstos para las siguientes décadas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la dirección del Laboratorio de Microbiología Agrícola de la Universidad de Costa Rica por fomentar la producción científica y promover la divulgación académica

ÉTICA, CONFLICTO DE INTERESES Y DECLARACIÓN DE FINANCIAMIENTO

Declaro haber cumplido con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la preparación de este documento; que no hay conflictos de interés de ningún tipo. Asimismo, estoy de acuerdo con la versión editada final de esta publicación. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

REFERENCIAS

- Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., Truu, J., Rees, R. M., & Smith, P. (2019). A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology*, 25(8), 2530. <https://doi.org/10.1111/GCB.14644>
- Acharya, P., Ghimire, R., Idowu, O. J., & Shukla, M. K. (2024). Cover cropping enhanced soil aggregation and associated carbon and nitrogen storage in semi-arid silage cropping systems. *CATENA*, 245, 108264. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2024.108264>
- Adedayo, A. A., & Olorunkosebi, M. T. (2025). Coevolution Dynamics of Beneficial and Pathogenic Microbes in Plant–Microbe Interactions. *Biology* 2025, 14(11), 1505. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY14111505>
- Andén, D. A., & Pizzolon, L. A. (2025). Procesos de eutrofización en los ríos Azul y Quemquemtrey, subcuenca del Lago Puelo, Argentina. *Ecología Austral*, 35(1), 001–015. <https://doi.org/10.25260/EA.25.35.1.0.2335>
- Artavia-Rodríguez, L. G., Masís-Campos, R., & Ávalos-Rodríguez, G. (2024). Análisis espacio-temporal del régimen de fuego en las sábanas húmedas del Pacífico Sur de Costa Rica mediante datos MODIS 2001-2022. *Revista de geografía Norte Grande*, 2024(87), 1–16. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022024000100112>



- Bach, E. M., Williams, R. J., Hargreaves, S. K., Yang, F., & Hofmockel, K. S. (2018). Greatest soil microbial diversity found in micro-habitats. *Soil Biology and Biochemistry*, 118, 217–226. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2017.12.018>
- Badía, D., López-García, S., Martí, C., Ortiz-Perpiñá, O., Girona-García, A., & Casanova-Gascón, J. (2017). Burn effects on soil properties associated to heat transfer under contrasting moisture content. *Science of The Total Environment*, 601–602, 1119–1128. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.05.254>
- Basche, A. D., Archontoulis, S. V., Kaspar, T. C., Jaynes, D. B., Parkin, T. B., & Miguez, F. E. (2016). Simulating long-term impacts of cover crops and climate change on crop production and environmental outcomes in the Midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 218, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.011>
- Basche, A. D., Kaspar, T. C., Archontoulis, S. V., Jaynes, D. B., Sauer, T. J., Parkin, T. B., & Miguez, F. E. (2016). Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 172, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.006>
- Bejar-Pulido, S. J., Hernández, F. J., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Luna-Robles, E. O., & Domínguez-Gómez, T. G. (2024). Propiedades mecánicas y químicas de las raíces de árboles nativos y su posible efecto sobre la estabilidad del suelo en Durango, México. *Polibotánica*, 0(57), 107–124. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.57.6>
- Bojórquez Serrano, J. I., Castillo Pacheco, L. A., Hernández Jiménez, A., García Paredes, J. D., & Madueño Molina, A. (2015). Cambios en las reservas de carbono orgánico del suelo bajo diferentes coberturas. *Cultivos tropicales*, 36(4), 63. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v36n4/ctr08415.pdf>
- Bowles, T. M., Jackson, L. E., Loeher, M., & Cavagnaro, T. R. (2017). Ecological intensification and arbuscular mycorrhizas: a meta-analysis of tillage and cover crop effects. *Journal of Applied Ecology*, 54(6), 1785–1793. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12815>
- Capurro, J. E., & Montico, S. (2022). Efectos de cultivos de cobertura sobre el agua del suelo, el aporte de carbono al sistema y el rendimiento de soja en diferentes ambientes. *Revista FAVE*, 21(1), 49–65. <https://doi.org/10.14409/FA.V21I1.11114>
- Carrer, D., Pique, G., Ferlicoq, M., Ceamanos, X., & Ceschia, E. (2018). What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops. *Environmental Research Letters*, 13(4), 044030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab650>
- Chen, G., & Weil, R. R. (2010). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 331(1), 31–43. <https://doi.org/10.1007/S11104-009-0223-7/TABLES/5>



- Chen, L., Reyes, R. M., Aglasan, S., Hagen, S. C., & Salas, W. (2022). The impact of cover crops on soil erosion in the US Midwest. *Journal of Environmental Management*, 324, 116168. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.116168>
- Dagatti, C. V., Campón, F. F., González, M. F., Mazzitelli, M. E., Marcucci, B., Solís, S. E., Bonfanti, S., & Uliarte, E. M. (2024). Diversidad de insectos, colémbolos y arañas en viñedos bajo diferentes sistemas de producción, convencional y agroecológico, en Mendoza, Argentina. *Ecología Austral*, 34(1), 141–158. <https://doi.org/10.25260/EA.24.34.1.0.2272>
- Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P. A., & Zhao, W. (2018). Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Science Reviews*, 185, 357–373. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2018.06.013>
- De Baets, S., Poesen, J., Meersmans, J., & Serlet, L. (2011). Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. *CATENA*, 85(3), 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.009>
- de Lima, R. P., Rolim, M. M., Toledo, M. P. S., Tormena, C. A., da Silva, A. R., e Silva, I. A. C., & Pedrosa, E. M. R. (2022). Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 215, 105215. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.105215>
- dos Santos Cordeiro, C. F., Echer, F. R., & Araujo, F. F. (2021). Cover Crops Impact Crops Yields by Improving Microbiological Activity and Fertility in Sandy Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21:3, 21(3), 1968–1977. <https://doi.org/10.1007/S42729-021-00494-0>
- Dowdeswell-Downey, E., Grabowski, R. C., & Rickson, R. J. (2023). Do temperature and moisture conditions impact soil microbiology and aggregate stability? *Journal of Soils and Sediments* 2023 23:10, 23(10), 3706–3719. <https://doi.org/10.1007/S11368-023-03628-2>
- Drever, C. R., Cook-Patton, S. C., Akhter, F., Badiou, P. H., Chmura, G. L., Davidson, S. J., Desjardins, R. L., Dyk, A., Fargione, J. E., Fellows, M., Filewod, B., Hessing-Lewis, M., Jayasundara, S., Keeton, W. S., Kroeger, T., Lark, T. J., Le, E., Leavitt, S. M., LeClerc, M.-E., ... Kurz, W. A. (2021). Natural climate solutions for Canada. *Science Advances*, 7(23). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd6034>
- Eckert, M., Mathulwe, L. L., Gaigher, R., Joubert-van der Merwe, L., & Pryke, J. S. (2020). Native cover crops enhance arthropod diversity in vineyards of the Cape Floristic Region. *Journal of Insect Conservation*, 24(1), 133–149. <https://doi.org/10.1007/S10841-019-00196-0>
- Enríquez-Quiroz, J. F., Esqueda-Esquivel, V. A., Ángel-Hernández, A., & Zárate-Martínez, J. P. (2025). Supresión de malezas con leguminosas de cobertura en huertas de cítricos. *Jóvenes en la Ciencia*, 34, 1–6. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4723>

- Farmaha, B. S., Sekaran, U., & Franzluebbers, A. J. (2022). Cover cropping and conservation tillage improve soil health in the southeastern United States. *Agronomy Journal*, 114(1), 296–316. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.20865>
- Fernández, R., Quiroga, A., & Noellemeyer, E. (2012). Cultivos de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semiárida pampeana? *Argentina*, 30(2), 137–150.
- Final, V., & Cristini, M. (2023). *El sector agropecuario extensivo en América Latina: oportunidades y desafíos del cambio climático y la protección de la biodiversidad*. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2035>
- Finney, D. M., Buyer, J. S., & Kaye, J. P. (2017). Living cover crops have immediate impacts on soil microbial community structure and function. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(4), 361–373. <https://doi.org/10.2489/JSWC.72.4.361;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Finney, D. M., White, C. M., & Kaye, J. P. (2016). Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures. *Agronomy Journal*, 108(1), 39–52. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0182>
- Fiorini, A., Remelli, S., Boselli, R., Mantovi, P., Ardenti, F., Trevisan, M., Menta, C., & Tabaglio, V. (2022). Driving crop yield, soil organic C pools, and soil biodiversity with selected winter cover crops under no-till. *Soil & Tillage Research*, 217, 105283. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105283>
- Gao, Z., Chang, R., Nzube, A., Ahmad, N., Peng, Y., Zhang, J., Liu, Z., & Wang, T. (2025). Nitrogen addition enhances soil aggregate stability by increasing the contents of microbial gluing agents in a subalpine forest. *Plant and Soil*, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-07172-x>
- Garg, J., & Rakshit, A. (2024). Compost Tea: An Emerging Nature-Based Supplement Strengthening Options for Durable Agriculture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 2024 24:4, 24(4), 8075–8098. <https://doi.org/10.1007/S42729-024-02100-5>
- Garland, G., Edlinger, A., Banerjee, S., Degrunne, F., García-Palacios, P., Pescador, D. S., Herzog, C., Romdhane, S., Saghai, A., Spor, A., Wagg, C., Hallin, S., Maestre, F. T., Philippot, L., Rillig, M. C., & van der Heijden, M. G. A. (2021). Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nature Food*, 2(1), 28–37. <https://doi.org/10.1038/S43016-020-00210-8>
- Golroodbari, S., & van Sark, W. (2022). On the effect of dynamic albedo on performance modelling of offshore floating photovoltaic systems. *Solar Energy Advances*, 2, 100016. <https://doi.org/10.1016/J.SEJA.2022.100016>



- Gómez, J. A., Campos, M., Guzmán, G., Castillo-Llanque, F., Vanwalleghem, T., Lora, Á., & Giráldez, J. V. (2018). Soil erosion control, plant diversity, and arthropod communities under heterogeneous cover crops in an olive orchard. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 977–989. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8339-9>
- González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Valenzuela-Núñez, L. M. (2011). Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 369–377. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n4/2395-8030-tl-29-04-00369.pdf>
- Guevara-Bonilla, M., Briceño-Elizondo, E., Esquivel-Segura, E., Arguedas, M., & Arias-Aguilar, D. (2021). Cover crops as a weed control method and their effect on the initial growth of a tectona grandis plantation. *Floresta*, 51(1), 184–191. <https://doi.org/10.5380/RF.V51i1.67857>
- Haque, M. A., Ku, S., & Haruna, S. I. (2024). Soil thermal properties: influence of no-till cover crops. *Canadian Journal of Soil Science*, 104(3), 246–256. <https://doi.org/10.1139/CJSS-2023-0095>
- Hartley, I. P., Hill, T. C., Chadburn, S. E., & Hugelius, G. (2021). Temperature effects on carbon storage are controlled by soil stabilization capacities. *Nature Communications* 2021 12:1, 12(1), 6713-. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27101-1>
- Haruna, S. I., Anderson, S. H., Nkongolo, N. V., & Zaibon, S. (2018). Soil Hydraulic Properties: Influence of Tillage and Cover Crops. *Pedosphere*, 28(3), 430–442. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60387-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60387-4)
- Hudek, C., Putinica, C., Otten, W., & De Baets, S. (2022). Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13147. <https://doi.org/10.1111/EJSS.13147;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Huerta-Olague, J. de J., Oropeza Mota, J. L., Guevara Gutiérrez, R. D., Ríos Berber, J. D., Martínez Menes, M. R., Barreto García, O. A., Olguín López, J. L., & Mancilla Villa, O. R. (2018). Efecto de la cobertura vegetal de cuatro cultivos sobre la erosión del suelo. *Idesia (Arica)*, 36(2), 153–162. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005000701>
- Kaspar, T. C., & Singer, J. W. (2011). The Use of Cover Crops to Manage Soil. En J. L. Hatfield & T. J. Sauer (Eds.), *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture* (pp. 321–337). Wiley. <https://doi.org/10.2136/2011.soilmanagement.c21>
- Kasper, S., Mohsin, F., Richards, L., & Racelis, A. (2022). Cover crops may exacerbate moisture limitations on South Texas dryland farms. *Journal of Soil and Water Conservation*, 77(3), 261–269. <https://doi.org/10.2489/JSWC.2022.00088>

- Kaye, J. P., & Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
- Khan, M. T., Aleinikovienė, J., & Butkevičienė, L. M. (2024). Innovative Organic Fertilizers and Cover Crops: Perspectives for Sustainable Agriculture in the Era of Climate Change and Organic Agriculture. *Agronomy* 2024, 14(12), 2871. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14122871>
- Langelier, M., Chantigny, M. H., Pageau, D., & Vanasse, A. (2021). Nitrogen-15 labelling and tracing techniques reveal cover crops transfer more fertilizer N to the soil reserve than to the subsequent crop. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 313, 107359. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2021.107359>
- López-Vicente, M., Gómez, J. A., Guzmán, G., Calero, J., & García-Ruiz, R. (2021). The role of cover crops in the loss of protected and non-protected soil organic carbon fractions due to water erosion in a Mediterranean olive grove. *Soil & Tillage Research*, 213, 105–119. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105119>
- Luis Bernal Albendín, J. (2023). *Planes de Sostenibilidad en la Agricultura*. Cámara de Comercio de Orihuela. https://www.camaraorihuela.es/wp-content/uploads/2023/12/Guia_IVACE_PLANES_DE_SOSTENIBILIDAD_EN_AGRICULTURA-002.pdf
- Lyu, D., Msimbira, L. A., Nazari, M., Antar, M., Pagé, A., Shah, A., Monjezi, N., Zajonc, J., Tanney, C. A. S., Backer, R., & Smith, D. L. (2021). The Coevolution of Plants and Microbes Underpins Sustainable Agriculture. *Microorganisms* 2021, 9(5), 1036. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS9051036>
- MacHmuller, M. B., Kramer, M. G., Cyle, T. K., Hill, N., Hancock, D., & Thompson, A. (2015). Emerging land use practices rapidly increase soil organic matter. *Nature Communications* 2015, 6(1), 6995-. <https://doi.org/10.1038/ncomms7995>
- Maqbool, Z., Farooq, M. S., Rafiq, A., Uzair, M., & Hussain, Q. (2025). Utilization of Climate-Smart Conservation Agriculture Practices for Improved Soil Carbon Sequestration, Greenhouse Gas Mitigation and Sustainable Crop Productivity. *Soil Use and Management*, 41(2), e70103. <https://doi.org/10.1111/SUM.70103>
- Martínez, J. P., Crespo, C., Cuervo, M. T., Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., Martínez, F., Cordone, G., & Barbieri, P. A. (2020). Cultivos de cobertura: propiedades físicas secuencias de cultivos con predominio de soja: efecto sobre indicadores de calidad física del suelo. *Cienc. Suelo (Argentina)*, 38(2), 224–235.

- Ministerio de Ambiente y Energía. (2019). *Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050*.
<https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/PLAN-NACIONAL-DESCARBONIZACION.pdf>
- Mohammed, S., Hassan, E., Abdo, H. G., Szabo, S., Mokhtar, A., Alsafadi, K., Al-Khour, I., & Rodrigo-Comino, J. (2021). Impacts of rainstorms on soil erosion and organic matter for different cover crop systems in the western coast agricultural region of Syria. *Soil Use and Management*, 37(1), 196–213. <https://doi.org/10.1111/SUM.12683>
- Montenegro-Gómez, S. P., Nieto-Gómez, L. E., & Giraldo-Díaz, R. (2022). Efecto de prácticas agroecológicas en la conservación del suelo de la Zona de Reserva Campesina de San Isidro, Pradera, Valle del Cauca. *Entramado*, 18(2), 8002. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.8002>
- Morales-Rojas, E., Chávez-Quintana, S., Hurtado-Burga, R., Milla-Pino, M., Sanchez-Santillán, T., & Collazos-Silva, E. M. (2021). Macrofauna edáfica asociada al cultivo de maíz (*Zea mays*). *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 9(1), 15–25.
<https://doi.org/10.36610/j.jsab.2021.090100015>
- Muñoz, M. J., & Monasterio, B. (2024). Influencia de la cobertura vegetal en la escorrentía superficial: un estudio experimental. *Revista Nothofagus*, 9(1), 33–41.
<https://revistanothofagus.ulagos.cl/index.php/nothofagus/article/view/90>
- Narbona, C., Riechmann, J., Herrero, Y., Herrera, J., Barricarte, G., & Lallana, M. (2023). Perspectivas ecologistas sobre el tema de nuestro tiempo. *Pensamiento al margen. Revista Digital de Ideas Políticas*, (12), 24–49. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/133404>
- Nerva, L., Sandrini, M., Moffa, L., Velasco, R., Balestrini, R., & Chitarra, W. (2022). Breeding toward improved ecological plant–microbiome interactions. *Trends in Plant Science*, 27(11), 1134–1143. <https://doi.org/10.1016/J.TPLANTS.2022.06.004>
- Nnanguma, K. A. (2026). Assessing the Impact of Soil Erosion on Rural Livelihoods and Food Security in Support of the Sustainable Development Goals (SDGs). *ASEAN Journal of Agriculture and Food Engineering*, 5(1), 1–10.
<https://www.ejournal.bumipublikasinusantara.id/index.php/ajafe/article/view/874>
- Pelchor Chicaiza, J. S., & De la Fuente de Val, G. (2025). Agroecología y Desarrollo Rural: un enfoque integral para la sostenibilidad agrícola. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, 1–39.
<https://doi.org/10.15359/PRNE.23-46.4>
- Pinargote-Yepetz, M., Guevara-López, S., & Rosero, M. (2024). Análisis de los Consumidores y Marketing Sostenible: Una Perspectiva hacia la Responsabilidad Ambiental y Social. *Revista Publicando*, 11(41), 75–83. <https://doi.org/10.51528/RP.VOL11.ID2401>

- Pinto, P., Fernández Long, M. E., & Piñeiro, G. (2017). Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.028>
- Ponce, J. P., Siliquini, O. A., & Fernández, R. (2020). Cover Crops as Predecessor of Pumpkin Crop in the Semiarid Pampa Region. *Semiárida Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam*, 30(2), 51–61. [https://doi.org/10.19137/semiarida.2020\(02\).51-61](https://doi.org/10.19137/semiarida.2020(02).51-61)
- Ponyane, P., Dina Ebouel, F. J., & Eze, P. N. (2025). Formation pathways, ecosystem functions, and the impacts of land use and environmental stressors on soil aggregates. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1628746. <https://doi.org/10.3389/FENV.2025.1628746/FULL>
- Programa Estado de la Nación. (2024). *Informe Estado de la Nación 2024 (Informe Estado de la Nación No. 30)*. <https://estadonacion.or.cr/?informes=informe-estado-de-la-nacion-2024>
- Programa Estado Nación. (2025). *Programa Estado Nación*. https://estadonacion.or.cr/capitulo/?doc=IEN2025_cap4
- Quijano, L. E. O., Vega, W. N. O., Atencia, J. M., & Torres, K. R. C. (2021). La densidad aparente y el tamaño de agregados del suelo controlan el crecimiento radical de *Megathyrsus maximus*. *Acta Agronómica*, 70(4). <https://doi.org/10.15446/ACAG.V70N4.88785>
- Quintarelli, V., Radicetti, E., Allevato, E., Stazi, S. R., Haider, G., Abideen, Z., Bibi, S., Jamal, A., & Mancinelli, R. (2022). Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. *Agriculture* 2022, Vol. 12, Page 2076, 12(12), 2076. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12122076>
- Quispe, S. S., Dávalos, K. M., Sangay-Tucto, S., & de la Cruz, R. C. C. (2021). Use of cover crops for sustainable soil management associated with corn (*Zea mays* L.) cultivation. *Scientia Agropecuaria*, 12(3), 329–336. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.036>
- Rakkar, M., Deiss, L., & Dick, W. A. (2025). Soil carbon storage or sustainable conservation agriculture practices—Which should be our goal? *Journal of Environmental Quality*, 54(6), 1586–1597. <https://doi.org/10.1002/jeq2.70073>
- Ren, L., Yang, H., Li, J., Zhang, N., Han, Y., Zou, H., & Zhang, Y. (2025). Organic fertilizer enhances soil aggregate stability by altering greenhouse soil content of iron oxide and organic carbon. *Journal of Integrative Agriculture*, 24(1), 306–321. <https://doi.org/10.1016/J.JIA.2024.05.026>
- Restovich, S. B., Andriulo, A. E., & Améndola, C. (2011). Introducción de cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: efecto sobre algunas propiedades del suelo. *Ciencia del suelo*, 29(1), 61–73. <https://www.scielo.org.ar/img/revistas/cds/v29n1/html/v29n1a07.htm>
- Rimski-Korsakov, H., & Lavado, R. S. (2021). ¿Cambian los flujos de nitrógeno en maíz fertilizado seguido por un cultivo de cobertura ante diferentes condiciones hídricas? Do nitrogen fluxes



change in fertilized corn followed by a cover crop under different water conditions? *Rev. Facultad de agronomía UBA*, 41(2), 138–148.

Scaglione, J., Montico, S., & Montero, G. (2023). Efectos a corto plazo de los cultivos de cobertura sobre propiedades y macrofauna del suelo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3645>

Schmidt, R., Gravuer, K., Bossange, A. V., Mitchell, J., & Scow, K. (2018). Long-term use of cover crops and no-till shift soil microbial community life strategies in agricultural soil. *Plos One*, 13(2), e0192953. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0192953>

Schön, J., Gentsch, N., & Breunig, P. (2024). Cover crops support the climate change mitigation potential of agroecosystems. *Plos One*, 19(5), e0302139. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0302139>

Schweitzer, J. A., Juric, I., van de Voorde, T. F. J., Clay, K., van der Putten, W. H., & Bailey, J. K. (2014). Are there evolutionary consequences of plant–soil feedbacks along soil gradients? *Functional Ecology*, 28(1), 55–64. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12201>

Seitz, D., Fischer, L. M., Dechow, R., Wiesmeier, M., & Don, A. (2022). The potential of cover crops to increase soil organic carbon storage in German croplands. *Plant and Soil* 2022 488:1, 488(1), 157–173. <https://doi.org/10.1007/S11104-022-05438-W>

Sieber, P., Böhme, S., Ericsson, N., & Hansson, P.-A. (2022). Albedo on cropland: Field-scale effects of current agricultural practices in Northern Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 321, 108978. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108978>

Sinaluisa, F. D., Sinaluisa, F. D., León-Ruiz, J. E., Peralta-Culcay, M. E., & Suárez-Tapia, A. (2022). Valoración de la relación C/N de dos cultivos de cobertura Vicia (*Vicia stenophylla*) y Centeno (*Secale cereale*) en tres localidades de la provincia de Chimborazo. *Polo del Conocimiento*, 7(2), 1683–1695. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i2.3673>

Strickler, D. (2021). *The Complete Guide to Restoring Your Soil: Improve Water Retention and Infiltration*. North Adams: Storey Publishing, LLC.

Thapa, V. R., Ghimire, R., Acosta-Martínez, V., Marsalis, M. A., & Schipanski, M. E. (2021). Cover crop biomass and species composition affect soil microbial community structure and enzyme activities in semiarid cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 157, 103735. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2020.103735>

Traware, O., Zhang, Y., Wang, L., Hopke, P. K., & Muluneh, M. G. (2025). Carbon footprint of agricultural pesticides on main crops in China from 2011 to 2023. *Journal of Environmental Management*, 394, 127605. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.127605>



- Úbeda Rivera, J. S., & Delgado Dallatorre, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Rev. iberoam. bioecon. cambio clim.*, 4(7), 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>
- Uhaldegaray, M. G., Fernández, R., Kloster, N., & Quiroga, A. R. (2024). Cultivos de cobertura en sistemas ganaderos: producción de biomasa y efectos sobre el suelo. *Semiárida: Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam*, 35(1), 77–86. [https://doi.org/10.19137/semiarida.2025\(1\).77-86](https://doi.org/10.19137/semiarida.2025(1).77-86)
- Valdés, Y. B., Galán, Á. L., & Lizazo, I. C. (2021). Las arvenses como hospedantes de microorganismos en un agroecosistema de sucesión *Zea mays* L.-*Phaseolus vulgaris* L. *Acta Agronómica*, 70(2), 133–140. <https://doi.org/10.15446/ACAG.V70N2.95601>
- Varela, M. F., Fernández, P. L., Rubio, G., & Taboada, M. Á. (2011). Cultivos de cobertura: efectos sobre la macroporosidad y la estabilidad estructural de un suelo franco-limoso Cover crops: effects on soil macroporosity and soil structural stability in a silt loam soil. *Ciencia del suelo*, 29(1), 99–106. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672011000100011
- Verzeaux, J., Alahmad, A., Habbib, H., Nivelles, E., Roger, D., Lacoux, J., Decocq, G., Hirel, B., Catterou, M., Spicher, F., Dubois, F., Duclercq, J., & Tetu, T. (2016). Cover crops prevent the deleterious effect of nitrogen fertilization on bacterial diversity by maintaining the carbon content of ploughed soil. *Geoderma*, 281, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.035>
- Vidal Morant, M., Scheid, S. M., du Mortier, B., van Haren, C., de Wit, A., & Hijbeek, R. (2026). Agronomic constraints limit the climate change mitigation potential of winter cover crops in Europe. *European Journal of Agronomy*, 172, 127844. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2025.127844>
- Villagra-Mendoza, K., Brenes-Cano, D., & Gómez-Calderón, N. (2023). Efecto del balanceo de cargas en los ejes de tractores agrícolas sobre la eficiencia de labranza y las propiedades físico-mecánicas de un suelo vertisol. *Agronomía Costarricense*, 47(1), 101–121. <https://doi.org/10.15517/rac.v47i1.53968>
- Vukicevich, E., Lowery, T., Bowen, P., Urbez-Torres, J. R., & Hart, M. (2016). Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(3), 36–48. <https://doi.org/10.1007/S13593-016-0385-7>
- Wang, G., van der Putten, W. H., Klironomos, J., Zhang, F., & Zhang, J. (2025). Steering plant-soil feedback for sustainable agriculture. *Science*, 389(6758), eads2506. <https://doi.org/10.1126/science.ads2506>

- Wong, K. M., Griffiths, M., Moran, A., Johnston, A., Liu, A. E., Sellers, M. A., & Topp, C. N. (2024). Cover crop cultivars and species differ in root traits potentially impacting their selection for ecosystem services. *Plant and Soil*, 500(1–2), 279–296. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06431-7>
- Yaguache Ordóñez, L. A. (2022). Humedad y almacenamiento de agua en el suelo en cuatro tipos de cobertura vegetal. *Ciencia y Tecnología*, 15(1), 19–24. <https://doi.org/10.18779/cyt.v15i1.539>
- Yu, T., Mahe, L., Li, Y., Wei, X., Deng, X., & Zhang, D. (2022). Benefits of Crop Rotation on Climate Resilience and Its Prospects in China. *Agronomy*, 12(2), 436. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020436>

