

Explorando el estado del arte de la labranza y su impacto en la calidad del suelo y la productividad agrícola: una revisión crítica de los últimos 20 años

Exploring the state of the art of tillage and its impact on soil quality and agricultural productivity: a critical review of the last 20 years

Carlos Alcides Villalba Algarin^{1*}, Alodia Concepción González¹, Javier Emilio Szostak¹ y Marcos Fabian Sanabria Franco²

¹ Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Centro de Investigación Capitán Miranda, Departamento de Suelos. Itapúa, Paraguay.

² Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Ciências Biológicas. São Paulo, Brasil.

RESUMEN

La labranza ha constituido un pilar fundamental en la instalación y evolución de la agricultura a lo largo del tiempo. Sin embargo, su impacto en la calidad del suelo y la productividad agrícola ha recibido atención significativa debido a los desafíos ambientales y la necesidad de una agricultura sostenible. Este estudio evaluó el estado del arte sobre las prácticas de labranza y su influencia en la calidad del suelo y la productividad agrícola en los últimos 20 años, mediante un análisis de 92 artículos de la base de datos Web of Science. Los resultados revelan un creciente interés en el tema en la última década, con contribuciones destacadas de Estados Unidos, China, Brasil, Canadá e India, enfocándose en sistemas conservacionistas y su relación con la calidad del suelo, la materia orgánica y la productividad agrícola. Los indicadores evaluados más frecuentemente incluyen parámetros físicos (densidad aparente, resistencia a la penetración, agregados, porosidad), químicos (nitrógeno, fósforo, potasio, pH) y biológicos (carbono orgánico, biomasa microbiana, actividades enzimáticas). La revisión sugiere que los sistemas de labranzas conservacionistas tienden a mejorar la calidad del suelo y la productividad de cultivos. Sin embargo, algunos estudios presentan resultados contradictorios en cuanto a la calidad física del suelo y la productividad, atribuibles a factores intrínsecos. Para entender mejor los impactos de las prácticas de labranza, es crucial realizar investigaciones a nivel nacional que consideren las exigencias edafoclimáticas de los diferentes cultivos, con el fin de identificar las condiciones en las que los sistemas conservacionistas resultan más eficientes para una agricultura más sustentable y resiliente.

Palabras clave: agricultura conservacionista, agricultura sustentable, investigación sistemática, salud del suelo, seguridad alimentaria.

ABSTRACT

Tillage has been a fundamental pillar in the establishment and evolution of agriculture over time. However, its impact on soil quality and agricultural productivity has received significant attention due to environmental challenges and the need for sustainable agriculture. This study assessed the state of the art on tillage practices and their influence on soil quality and agricultural productivity over the last 20 years, through an analysis of 92 articles from the Web of Science database. The results reveal a growing interest in the topic in the last decade, with notable contributions from the United States, China, Brazil, Canada, and India, focusing on conservation systems and their relationship with soil quality, organic matter, and agricultural productivity. The most frequently evaluated indicators include physical parameters (bulk density, penetration resistance, aggregates, porosity), chemical parameters (nitrogen, phosphorus, potassium, pH), and biological parameters (organic carbon, microbial biomass, enzymatic activities). The review suggests that conservation tillage systems tend to improve soil quality and crop productivity. However, some studies present contradictory results regarding soil physical quality and productivity, attributable to intrinsic factors. To better understand the impacts of tillage practices, it is crucial to conduct national-level research that considers the edaphoclimatic requirements of different crops, in order to identify the conditions under which conservation systems are most efficient for more sustainable and resilient agriculture.

Keywords: conservation agriculture, sustainable agriculture, systematic research, soil health, food security.

*Autor para correspondencia:

carlos.villalba@ipta.gov.py

Conflictos de interés:

No existe ningún tipo de conflicto a declarar.

Contribución de autores:

Todos los autores realizaron contribuciones sustanciales a la concepción y diseño de este estudio, al análisis e interpretación de los datos, revisión del manuscrito y aprobación de la versión final. Todos los autores asumen la responsabilidad del contenido del manuscrito.

Financiamiento:

Ninguno

Periodo de publicación:

Julio-Diciembre de 2024

Historial:

Recibido: 14/08/2024;

Aceptado: 19/12/2024

Editor responsable:

Arnaldo Esquivel-Fariña
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

Licencia:

Artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons CC-BY 4.0

INTRODUCCIÓN

Las prácticas de labranza han sido fundamentales en la agricultura desde tiempos ancestrales, desempeñando un papel crucial en la preparación del suelo para el cultivo (Mitchell et al., 2016). Sin embargo, estas prácticas afectan el perfil del suelo y repercuten en la productividad agrícola. Actualmente, se estima que más de un tercio de los suelos a nivel mundial están degradados debido a diversas actividades antropogénicas, una situación descrita como una “pandemia global” (Kooch et al., 2024).

La degradación de los suelos compromete diversos servicios ecosistémicos, incluyendo la producción agrícola, la mitigación del cambio climático, la seguridad alimentaria y la salud humana y animal (Solomon et al., 2024). Este problema se ve agravado por el rápido aumento de la población mundial y la consecuente necesidad de incrementar la producción en áreas cada vez más limitadas (FAO, 2011).

La intensificación de la agricultura moderna, caracterizada por el uso intensivo de prácticas de labranzas convencionales, ha contribuido significativamente a la degradación del suelo (FAO, 2022). La perturbación mecánica intensa del suelo resulta en la pérdida de materia orgánica, la disminución de la capacidad de retención de agua y la erosión (Thiengo et al., 2024). En respuesta a estos problemas, se han desarrollado y promovido prácticas alternativas de labranza que buscan minimizar la perturbación del suelo y mejorar su calidad a largo plazo.

Entre las alternativas más destacadas se encuentran la labranza mínima y la siembra directa (o labranza cero). La labranza mínima reduce la perturbación del suelo mediante el uso de implementos menos invasivos, mientras que la siembra directa evita completamente la remoción del suelo, manteniendo una cobertura permanente y promoviendo la acumulación de materia orgánica (Cui et al., 2022; Roy et al., 2021; Vieira et al., 2024). Estas prácticas forman parte de la agricultura conservacionista, también conocida como prácticas agrícolas climáticamente inteligentes (Tyagi & Haritash, 2024).

Además de reducir la perturbación del suelo, la agricultura conservacionista incluye la implementación de la rotación de cultivos asociados con abonos verdes, presentándose como una solución viable para mejorar la calidad del suelo (Al-Shammary et al., 2024; Hassani et al., 2024), que no solo reduce la erosión y mejora la estructura del suelo, sino que también aumenta su capacidad de retención de agua y nutrientes, promueve la biodiversidad del suelo, maximiza las cosechas y los beneficios económicos (Liu et al., 2023). Asimismo, contribuye a la mitigación del cambio climático al aumentar el secuestro de carbono en el suelo (Tyagi & Haritash, 2024).

En términos de porcentaje de superficie cultivada total, Brasil, Argentina y Paraguay se destacan en América del Sur, con más del 70% de sus tierras de cultivo manejadas bajo el sistema de siembra directa. En Paraguay, por ejemplo, este sistema abarca actualmente más de 3.500.000 hectáreas. Sin embargo, a pesar de los avances globales en la comprensión y aplicación de prácticas de labranza, el acceso limitado a información científica

especializada sigue siendo un desafío importante en países como Paraguay para una agricultura sustentable (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

Muchos agricultores e investigadores locales carecen de acceso a plataformas de bases de datos y enfrentan barreras idiomáticas que dificultan la utilización de investigaciones internacionales relevantes. En este contexto, este estudio tiene como objetivo proporcionar una revisión exhaustiva de las prácticas de labranza y su impacto en la calidad del suelo y la productividad agrícola en los últimos 20 años, utilizando un análisis bibliométrico y sistemático. Esta revisión busca identificar la evolución de la investigación, las perspectivas de las comunidades científicas sobre el tema, los países líderes en producción de información relevante, los indicadores críticos del suelo evaluados en los estudios y los principales impactos en la calidad del suelo y la productividad agrícola reportados, con el fin de orientar futuras investigaciones y promover prácticas agrícolas sostenibles adaptadas a las necesidades específicas de diferentes regiones, especialmente en Paraguay.

MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología de búsqueda y selección de artículos

Los procedimientos de revisión del estado del arte sobre labranza del suelo y sus impactos en la calidad del suelo y la productividad agrícola se llevaron a cabo siguiendo las directrices del método PRISMA 2020. Esta herramienta está diseñada para minimizar problemas relacionados con la recolección de datos y maximizar la transparencia científica de la revisión sistemática, a través de la inclusión de recursos y la definición clara de los criterios de elegibilidad y exclusión (Page et al., 2021).

Fuentes de información y búsqueda

Para este estudio, se empleó la base de datos de revistas electrónicas disponible en la plataforma Web of Science®—Clarivate (WOS). Se consideraron título, resumen y palabras clave en la búsqueda. Los operadores booleanos “AND” y “OR” se utilizaron para combinar los términos estratégicos seleccionados minuciosamente (Tabla 1).

Criterios de elegibilidad

La búsqueda fue limitada a artículos científicos publicados en inglés durante los últimos 20 años (01/01/2004 a 31/12/2023). La base de datos se refinó utilizando los siguientes criterios de elegibilidad: i) los estudios debían estar asociados con experimentos de campo; ii) los tratamientos evaluados debían consistir en diferentes tipos de labranzas de suelo; iii) los estudios necesitaban abordar al menos uno de los indicadores de la calidad del suelo (físico, químico, biológico); iv) los estudios tenían que presentar resultados sobre productividad de al menos uno de los tres cultivos más importantes a nivel mundial (soja, maíz, trigo).

Estrategia de recopilación de datos

Para integrar artículos científicos a la base de datos final,

Tabla 1. Términos de búsqueda utilizada en el proceso de revisión sistemática.

Base de datos	Términos y palabras clave de investigación
Web of Science	TITLE-ABS-KEY: (Soil ("preparation methods" OR "tillage practices")) AND (Soil AND (quality OR health OR properties OR attributes)) AND (Crop productivity AND (maize OR soybean OR wheat))

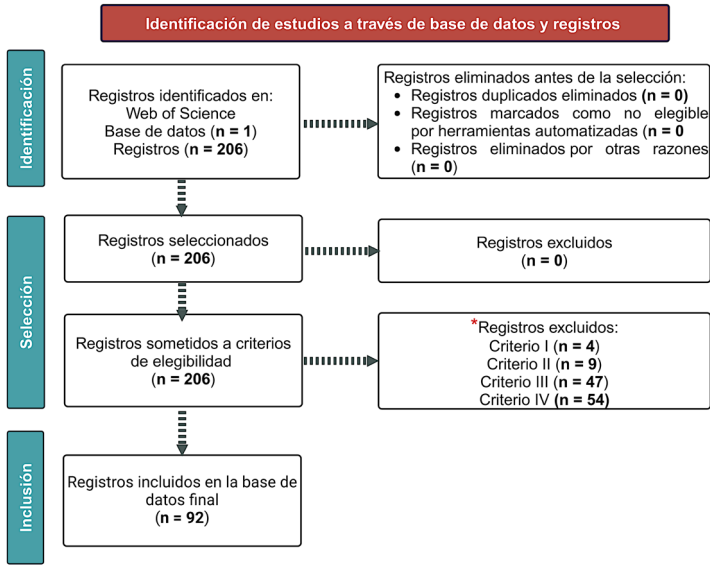


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de búsqueda, selección e inclusión de base de datos por declaración PRISMA 2020. Creado con BioRender.com.

se utilizó la plantilla del diagrama de flujo PRISMA (Figura 1), compuesta por tres etapas:

- 1) **Identificación:** Se identificaron términos y palabras clave estratégicos y se procedió a la búsqueda de artículos en la plataforma correspondiente (Tabla 1). En esta fase, se utilizó el gestor de referencias Mendeley Desktop para eliminar registros duplicados.
- 2) **Selección:** Se seleccionaron 206 artículos que superaron la primera etapa. Estos artículos fueron evaluados según los criterios de elegibilidad mediante una lectura minuciosa y solo aquellos que cumplían con todos los requisitos fueron registrados en una planilla Excel. De los 206 artículos, 114 fueron excluidos, quedando 92 seleccionados.
- 3) **Inclusión:** La tercera etapa consistió en la inclusión de los 92 artículos en la base de datos final. Los artículos fueron exportados en formato CSV y PDF para la extracción de datos, análisis y la elaboración de figuras correspondientes.

Análisis de datos

Análisis bibliométricos

El análisis bibliométrico abarcó: a) la evolución de las publicaciones científicas a lo largo del tiempo; para esta variable se registró manualmente el número de publicaciones por año ordenados en una planilla Excel y la construcción de la figura se realizó con el software SigmaPlot versión 12.5; b) contribución de los países y

principales cooperantes; c) enfoque de estudios sobre el asunto mediante análisis de palabras clave. Para las variables b y c, se utilizó el software VOSviewer versión 1.6.16 a fin de construir mapas de redes bibliométricos. Estos mapas estaban compuestos por clústeres y su conectividad, codificados por colores que facilitaron su interpretación. En los mapas, cada variable se representó con un círculo cuyo tamaño es proporcional al número de registros; los círculos más grandes indican puntuaciones más altas. Las líneas que unen los círculos representan la proximidad entre los temas, y su grosor indica la frecuencia de interacción (van Eck & Waltman, 2010).

Análisis sistemáticos

El análisis sistemático incluyó: a) identificación de los indicadores de calidad del suelo más evaluados en los estudios, recopilados mediante una revisión manual de los artículos y clasificados en indicadores físicos, químicos y biológicos; estos datos se registraron en una hoja de cálculo de Excel, y la figura se construyó utilizando el software SigmaPlot versión 12.5; b) evaluación del impacto de la labranza sobre la calidad del suelo y la productividad agrícola; para ello, los estudios seleccionados fueron analizados críticamente y sus resultados se sintetizaron para proporcionar una descripción general de los resultados principales sobre los indicadores de calidad del suelo (físico, químico y biológico) y productividad agrícola (trigo, maíz y soja). Las figuras se crearon con la herramienta Biorender.com.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bibliométricos

Evolución de las actividades científicas a lo largo del tiempo

En la Figura 2 se observa la evolución de las publicaciones científicas relacionadas con la labranza, la calidad del suelo y la productividad agrícola entre 2004 y 2023. Durante los primeros ocho años (2004-2011), el número de publicaciones se mantuvo relativamente bajo con solo ocho registros. Sin embargo, a partir de 2012, se observa un aumento significativo, pasando de cinco en 2012-2013 a siete publicaciones en 2014-2015. Esta tendencia positiva continuó en los años siguientes, con un crecimiento más pronunciado en los últimos ocho años (2016-2023), durante los cuales se publicaron 72 artículos, representando el 78% del total de la base de datos.

Estos resultados reflejan un creciente interés de la comunidad científica en comprender los impactos de la labranza sobre la calidad del suelo y la productividad agrícola (Demir & Gözübüyük, 2020; Khan et al., 2015; Liu et al., 2023; Zhao et al., 2022). La tendencia muestra la necesidad de identificar sistemas agrícolas que promuevan suelos saludables y maximicen la producción con un menor impacto ambiental. Estos objetivos son coherentes con políticas globales y acuerdos internacionales, como el Acuerdo de París, que abordan la degradación del suelo, el cambio climático y la seguridad alimentaria (FAO, 2022; IPCC, 2023).

Contribución de los países y principales cooperantes

Fueron identificados nueve países a nivel mundial que han publicado al menos cuatro artículos científicos durante el periodo 2004-2023 (Figura 3). Estados Unidos se destaca como el principal productor de artículos, seguido por China, Brasil, Canadá e India. El tamaño de los círculos en la figura es proporcional a la frecuencia de publicaciones, mostrando claramente la predominancia de Estados Unidos. Además, el grosor de las líneas de conexión

entre países refleja la frecuencia de cooperación en las publicaciones, destacando colaboraciones significativas entre Estados Unidos, Brasil y China en investigaciones sobre labranza, calidad del suelo y productividad agrícola.

Por otro lado, en cuanto a la distribución temporal de las publicaciones representada por la escala de colores, se distingue que China es el mayor productor seguido por India y Estados Unidos en los últimos años.

La inclusión de la evaluación de productividad de los cultivos de trigo, maíz y soja como criterio de elegibilidad en este trabajo resultó ser la más influyente en la base de datos final (Figura 1).

Sorprendentemente, los países líderes en investigación también son los principales productores globales de estos cultivos: Estados Unidos en maíz, China en trigo y Brasil en soja (Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas (CAPECO), 2024). Esta interdependencia entre investigación científica y productividad agrícola subraya cómo la inversión en investigación facilita el desarrollo de tecnologías agrícolas avanzadas y promueve prácticas más sostenibles.

No obstante, se destaca la notable ausencia de publicaciones científicas sobre el tema abordado en muchos países dependientes de la agricultura, como es el caso de Paraguay. Esta brecha representa una amenaza significativa para la producción agrícola desde el punto de vista de generación de conocimientos en un área relacionada a la seguridad alimentaria a nivel local. Es fundamental desarrollar políticas públicas basadas en ciencia que fortalezcan el desarrollo científico del país y promuevan la transferencia de conocimientos entre naciones con capacidades de investigación más avanzadas (Villalba Algarin et al., 2024).

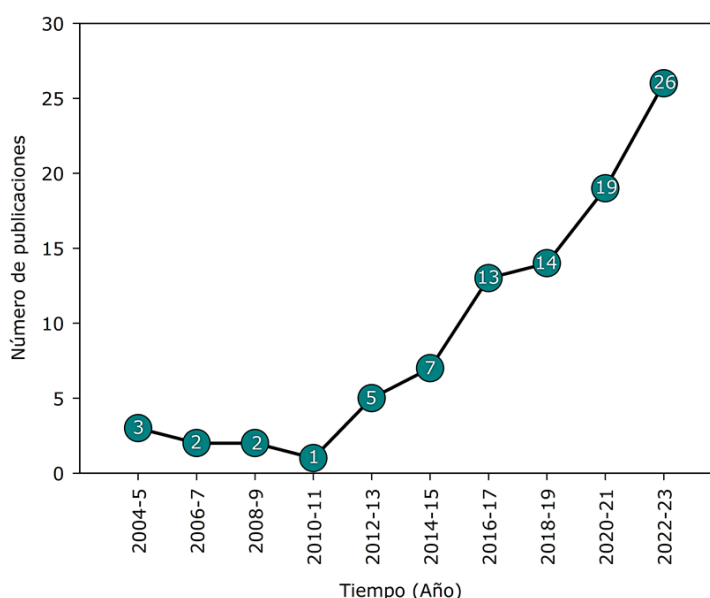


Figura 2. Evolución de las publicaciones científicas sobre labranza y su efecto en la calidad del suelo y productividad agrícola, de 2004 a 2023. Base de datos total de 92 artículos. Fuente: Web of Science, 2024.

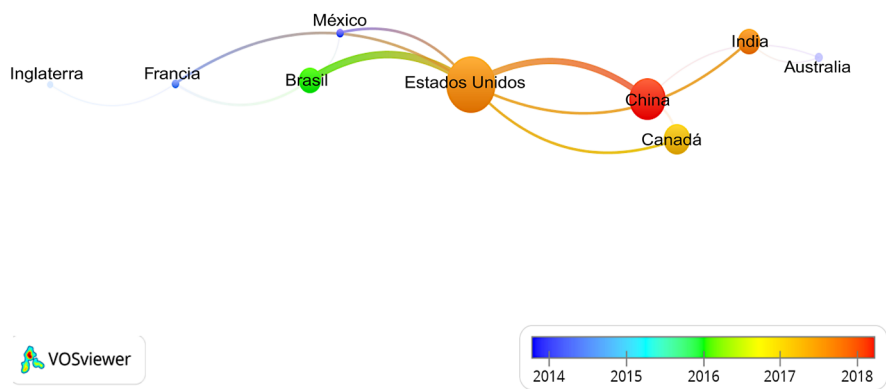


Figura 3. Mapa bibliométrico de contribución de países en publicaciones y principales cooperantes, mínimo de 4 publicaciones. Los colores representan el año promedio de publicación. El tamaño del círculo es proporcional a la frecuencia y las líneas representan la cooperación entre países en las publicaciones. Fuente: Web of Science, 2024.

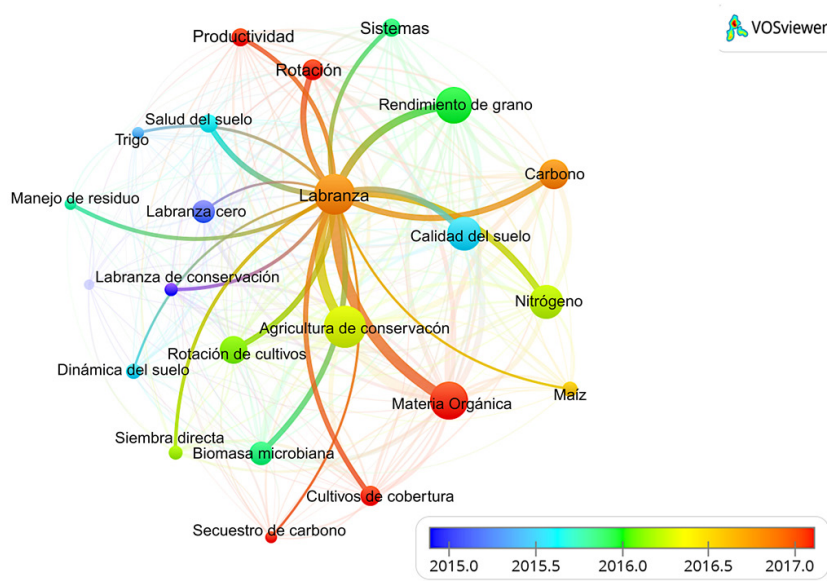


Figura 4. Mapa bibliométrico temporal de co-ocurrencias de palabras clave utilizadas por los autores, mínimo de 10 ocurrencias. Los colores representan el año promedio de publicación para cada palabra clave. El tamaño del círculo es proporcional a la frecuencia y las líneas representan la relación entre las palabras clave. Fuente: Web of Science, 2024.

Enfoque de los estudios a lo largo del tiempo

El análisis de las palabras clave concurrentes utilizadas por los autores en los artículos es crucial para orientar futuras investigaciones, ya que refleja las perspectivas predominantes de las comunidades científicas sobre el tema. La Figura 4 presenta la frecuencia de uso de estas palabras a través del tamaño de los círculos y su evolución temporal mediante una escala de colores. Se identificaron 22 palabras clave mencionadas en al menos 10 artículos, durante el periodo de investigación (2004-2023).

Entre las palabras clave más prominentes se encuentran labranza, agricultura de conservación, calidad del suelo, materia orgánica y rendimiento de grano. La representación temporal indica un interés creciente en prácticas como la rotación de cultivos, cultivos de cobertura, materia orgánica, secuestro de carbono y productividad agrícola, como evidencian los círculos de color rojo en la figura.

Las investigaciones actuales tienen un interés particular en las prácticas agrícolas conservacionistas como la siembra directa, la rotación de cultivos y el uso de cultivos de servicios. Estas prácticas han demostrado ser prometedoras para lidiar con los problemas contemporáneos (Debiasi et al., 2022). Estudios recientes han reportado que la agricultura de conservación no solo mejora la calidad del suelo y la productividad de los cultivos, sino que también desempeña un papel crucial en la mitigación de los impactos ambientales adversos, mediante la carbonización del suelo (Araya et al., 2016; Leharwan et al., 2023; Mitchell et al., 2017).

Sistemáticos

Indicadores de calidad de suelo evaluados en los estudios

La calidad del suelo se evalúa mediante indicadores físicos,

químicos y biológicos. Estos indicadores pueden ser analizados de forma individual o combinada, dependiendo del objetivo del estudio.

Indicadores físicos

La Figura 5 muestra que la densidad del suelo es el indicador físico más frecuentemente evaluado, con un 65% de los estudios, seguida por la resistencia del suelo a la penetración, que abarca el 50% de los estudios. Estos parámetros son esenciales para comprender la compactación del suelo resultante de las prácticas de labranza (Alam et al., 2014; Chen et al., 2023; Dam et al., 2005; Jabro et al., 2021).

Otros indicadores físicos importantes incluyen la estabilidad de agregados (40%) y la porosidad del suelo (35%), ambos fundamentales para la estructura y sostenibilidad del suelo. Estos indicadores influyen significativamente en la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes (Zhang et al., 2021; Zhao et al., 2022). Los indicadores como el contenido de agua en el suelo, la humedad del suelo, la tasa de infiltración de agua y la conductividad hidráulica, aunque menos frecuentemente evaluados, están ganando importancia en estudios recientes (Al-Shammmary et al., 2023; Du et al., 2023; Mathers et al., 2023; Sun et al., 2023). Estos parámetros son importantes para la gestión eficiente del agua en sistemas agrícolas, especialmente en el contexto del cambio climático (Du et al., 2023; Khokhar et al., 2022).

Indicadores químicos

El contenido total de nitrógeno se destaca como el indicador químico más evaluado, presente en el 45% de los estudios, seguido por el fósforo (33%), el potasio (28%) y el pH del suelo (27%) (Figura 5). Estos son indicadores fundamentales para el crecimiento de las plantas y la fertilización del suelo (Alijani et al., 2021; Babu et al., 2023). La alta frecuencia de evaluación de estas variables refleja la necesidad de ajustar las prácticas de manejo de

nutrientes para optimizar los rendimientos, reducir los costos de producción y minimizar la contaminación del agroecosistema.

La conductividad eléctrica se origina en la medición de la salinidad del suelo, un problema común en zonas áridas afectadas por la irrigación agrícola y aguas subterráneas poco profundas. Con el tiempo, se ha convertido en un método ampliamente aceptado para evaluar la variabilidad espacial de diversas propiedades fisicoquímicas del suelo (Ahmad et al., 2024). Se observó la relevancia de esta en regiones áridas, donde la acumulación de sales limita severamente la productividad agrícola (11%). La evaluación de la salinidad del suelo proporciona información espacial útil para la evaluación de la calidad del suelo y para el manejo de una agricultura de precisión en áreas productivas.

Indicadores biológicos

Dentro de los indicadores biológicos, el carbono orgánico del suelo se presenta como el más estudiado, representando el 63% de los análisis, seguido de la biomasa microbiana y las actividades enzimáticas, con 15% y 14% respectivamente (Figura 5). El carbono orgánico del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo, pues modifica la actividad biológica, física (estructura) y química del suelo (reciclaje y retención de nutrientes) (Zhang et al., 2023; Zhang et al., 2018). La biomasa microbiana y las actividades enzimáticas proporcionan información valiosa sobre la biología del suelo (Farhangi-Abri et al., 2021). La biomasa microbiana es un reflejo de la actividad y diversidad de los microorganismos (Araya et al., 2016; Pramanick et al., 2022).

Por otro lado, las actividades enzimáticas indican la capacidad del suelo para realizar procesos biológicos fundamentales, como la descomposición de la materia orgánica y la fijación del nitrógeno, que son importantes para el ciclo de nutrientes y crecimiento saludable de las

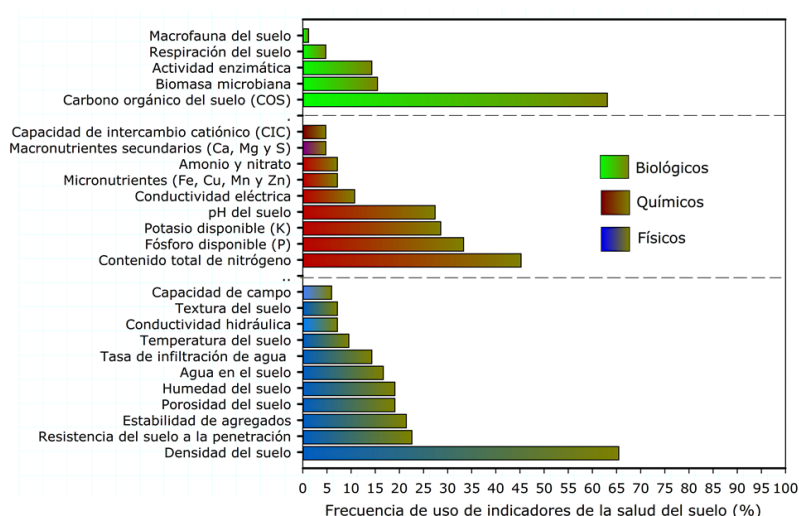


Figura 5. Frecuencia de uso de indicadores físicos químicos y biológicos (%) en estudios sobre labranzas y su efecto en la salud del suelo y productividad agrícola, de 2004 a 2023. Base de datos total de 92 artículos. Fuente: Web of Science, 2024.

plantas (Farhangi-Abriz et al., 2021).

Efectos de las labranzas en la calidad del suelo y productividad agrícola según estudios

En este apartado se presentan los principales resultados reportados en los estudios, basados en una revisión sistemática de la base de datos.

Efecto de las labranzas del suelo sobre los indicadores físicos

La labranza del suelo es un factor determinante en la calidad física del suelo. La mayoría de los estudios revisados destacan que la labranza convencional conduce a una significativa compactación del suelo, especialmente a profundidades mayores a 10 cm, en comparación con los sistemas conservacionistas (Araya et al., 2016; Dam et al., 2005; Díaz-Zorita et al., 2004; Hou et al., 2012; Jat et al., 2013; Ozpinar, 2010; Saha y Ghosh, 2013). Esto puede atribuirse al fenómeno conocido como "pie de arado", resultante del uso continuo de implementos perturbadores, afectando la estructura del suelo al reducir la formación de agregados estables en agua y la presencia de porosidad (Jat et al., 2013; Parihar et al., 2018, 2020; Pramanick et al., 2022; Singh et al., 2021; Zhang et al., 2023). Esta compactación incrementa la susceptibilidad del suelo a la erosión, limita la infiltración y retención de agua, afectando negativamente el crecimiento radicular y el acceso de las plantas a nutrientes esenciales (Ali et al., 2017; Araya et al., 2016; Das et al., 2017; Du et al., 2023; Khokhar et al., 2022; Pramanick et al., 2022; Salem et al., 2022; Sarker et al., 2022; Vilakazi et al., 2022; Yerli et al., 2023).



Figura 6. Resumen de los principales impactos de la labranza en los indicadores físicos del suelo mediante medidores de escala. Verde: beneficio para la calidad del indicador físico; amarillo: condición intermedia que requiere atención; naranja: impacto moderado; rojo: deterioro significativo. Creada con Biorender.com.

En contraste, algunos estudios han observado que los sistemas de labranza conservacionista, especialmente la siembra directa, puede resultar en una mayor densidad y menor porosidad del suelo en la capa superficial en comparación con la labranza convencional (Ahmed & Basir, 2023; Liu et al., 2015; Salem et al., 2015; Shahzad et al., 2016; Wang et al., 2015). Este efecto puede atribuirse al uso continuo de maquinaria pesada durante el manejo cultural de los cultivos. Sin embargo, otras investigaciones sugieren que la labranza del suelo no tiene un impacto significativo en la calidad física del suelo (Alam et al., 2014; Jabro et al., 2021; Kumar et al., 2006; Mu et al., 2016; Prasad et al., 2016; Zhao et al., 2022). Con todo esto, de acuerdo con el resumen de reportes (Figura 6), los sistemas de labranza conservacionistas siguen siendo una alternativa prometedora para mantener la calidad física del suelo.

Los resultados contrastantes obtenidos subrayan la necesidad de realizar investigaciones a nivel regional, debido a la influencia de los factores intrínsecos como la intensidad de las precipitaciones, la configuración del terreno, textura del suelo y las características propias de los cultivos (Cherubin & Schiebelbein, 2022). Es crucial incorporar sistemas de rotación que ofrezcan una mayor diversidad radicular, con el objetivo de optimizar la calidad física del suelo sin perturbaciones (Babu et al., 2023).

Efectos de la labranza del suelo sobre los indicadores químicos

Las prácticas de labranza influyen significativamente en los indicadores químicos del suelo (Figura 7), cruciales para la fertilidad y la productividad agrícola. Los sistemas conservacionistas, como la siembra directa y la labranza mínima, han demostrado mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio y azufre (Babu et al., 2023; Chaudhary et al., 2019; Dixit et al., 2019; Khokhar et al., 2022; Kumar et al., 2014; Leharwan et al., 2023; Mu et al., 2016; Pooniya et al., 2021; Pramanick et al., 2022; Prasad et al., 2016; Yadav et al., 2017). Estas prácticas reducen la perturbación del suelo, fomentando una mayor acumulación de materia orgánica y mejorando el ciclo de los nutrientes, lo cual reduce las pérdidas por erosión y lixiviación, beneficiando directamente a las plantas (Alam et al., 2014; Chen et al., 2023; Dixit et al., 2019; Khan et al., 2017; Naab et al., 2017; Parihar et al., 2020; Saha & Ghosh, 2013; Zhang et al., 2018).

Además, la labranza conservacionista ha demostrado aumentar la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC), mejorando así la retención y disponibilidad de cationes como calcio, magnesio y potasio, nutrientes esenciales para el crecimiento y vigorosidad de los cultivos (Pramanick et al., 2022; Wakwoya et al., 2022; Yadav et al., 2017). Otro beneficio reportado es el aumento del pH del suelo, lo que favorece la disponibilidad de nutrientes y la actividad de microorganismos beneficiosos (Alijani et al., 2021; Chandio et al., 2018; Díaz-Zorita et al., 2004; Khokhar et al., 2022; Wakwoya et al., 2022).

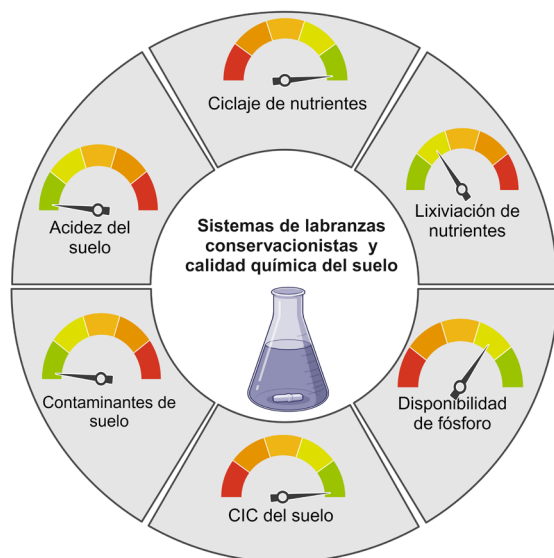


Figura 7. Resumen de los principales impactos de la labranza en los indicadores químicos del suelo mediante medidores de escala. Verde: beneficio para la calidad del indicador químico; amarillo: condición intermedia que requiere atención; naranja: impacto moderado; rojo: deterioro significativo. Creada con Biorender.com.

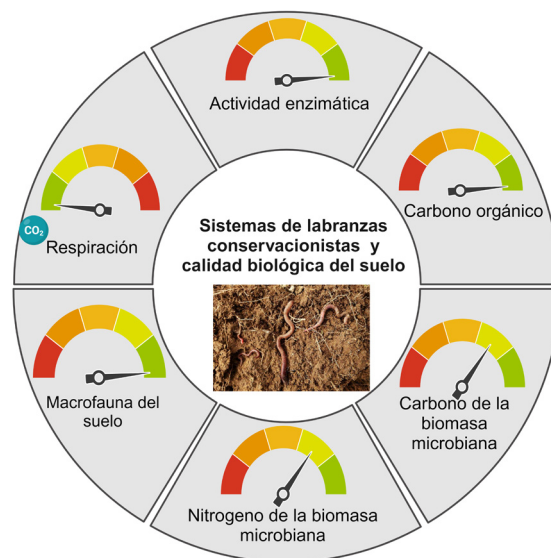


Figura 8. Resumen de los principales impactos de la labranza en los indicadores biológicos del suelo mediante medidores de escala. Verde: beneficio para la calidad del indicador biológico; amarillo: condición intermedia que requiere atención; naranja: impacto moderado; rojo: deterioro significativo. Creada con Biorender.com.

Efectos de las labranzas del suelo sobre los indicadores biológicos

Las prácticas conservacionistas han mostrado efectos positivos en la reducción de las emisiones de CO₂ al minimizar la perturbación del suelo y la oxidación de la materia orgánica (Babu et al., 2023; Demir & Gözübüyük, 2020). Este aspecto es clave en el contexto actual del cambio climático (Alijani et al., 2021).

La labranza conservacionista, especialmente cuando se combina con la rotación de cultivos, incrementa el contenido de carbono orgánico y la actividad microbiana del suelo (Ahmed & Basir, 2023; Araya et al., 2016; Chahal et al., 2021; S. Chen et al., 2022; Farhangi-Abriz et al., 2021; Parihar et al., 2018; Singh et al., 2021; Vilakazi et al., 2022).

Un mayor contenido de carbono orgánico mejora la estructura del suelo, la capacidad de retención de agua y la fertilidad. La biomasa microbiana es un indicador vital de la actividad biológica y la salud del suelo (Figura 8), ya que los microorganismos desempeñan un papel crucial en la descomposición de la materia orgánica y el reciclaje de los nutrientes (Chen et al., 2022; Pramanick et al., 2022; Sarker et al., 2022).

También se ha observado que las prácticas conservacionistas aumentan las actividades enzimáticas del suelo y la presencia de macrofauna (Das et al., 2017; Dixit et al., 2019; Pramanick et al., 2022; Zhang et al., 2018). Estas mejoras en la actividad biológica y enzimática son clave para la mineralización de nutrientes y la mejora de la estructura del suelo, favoreciendo la biodiversidad y promoviendo un

sistema agrícola más sostenible y resiliente (Chen et al., 2022; Pramanick et al., 2022).

Efectos de la labranza del suelo sobre la productividad agrícola

La productividad agrícola es un parámetro fundamental para evaluar la efectividad de las prácticas de labranza. La mayoría de los estudios sugieren que el sistema de labranza conservacionista puede incrementar la productividad de cultivos como trigo, maíz y soja (Ahmed & Basir, 2023; Araya et al., 2016; Hou et al., 2012; Jat et al., 2013; Khokhar et al., 2022; Leharwan et al., 2023; Liu et al., 2023; Mu et al., 2016; Pramanick et al., 2022; Prasad et al., 2016; RAM et al., 2022; Saha & Ghosh, 2013; Sun et al., 2023; Vilakazi et al., 2022; Yadav et al., 2017).

Sin embargo, algunos estudios informan una disminución en la productividad bajo estos sistemas (Khan et al., 2017; Kumar et al., 2014; Liu et al., 2015; Naab et al., 2017; Ozpinar & Ozpinar, 2015; Salem et al., 2015; Shahzad et al., 2016; Sharma et al., 2009; Wang et al., 2015; Zhang et al., 2023). Otros investigadores han encontrado que la labranza no tiene un impacto significativo en la productividad de los cultivos (Alam et al., 2014; Khan et al., 2015; Liu et al., 2013; Ozpinar, 2010; Wakwoya et al., 2022).

De manera general, los sistemas de labranza conservacionistas se asocian con diversos parámetros edáficos que conducen al aumento de la productividad agrícola. Como se ha evidenciado en esta investigación y representado en la Figura 9, estos sistemas tienden a mejorar la capacidad de retención y reciclaje de nutrientes, la retención de agua, la diversidad y actividad

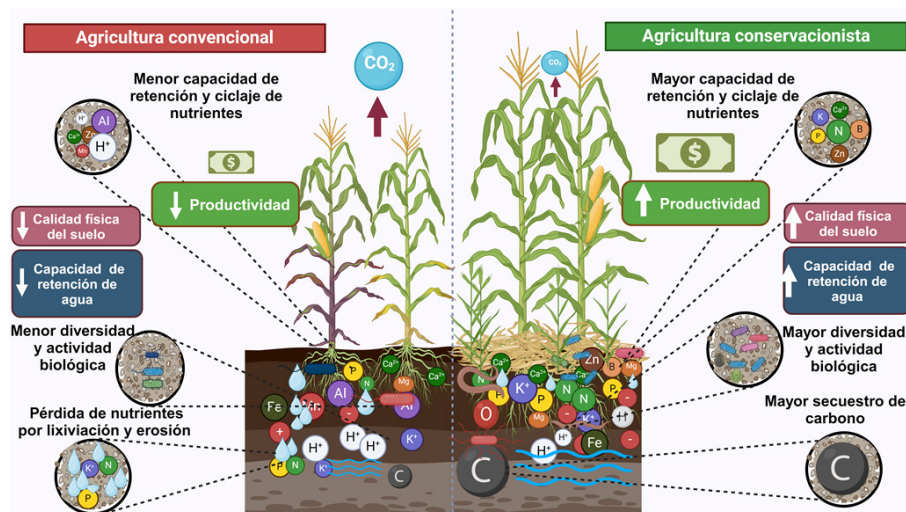


Figura 9. Resumen general de los principales hallazgos en las investigaciones, efectos de las labranzas sobre la calidad del suelo y productividad agrícola. Creado con Biorender.com

biológica del suelo, así como el secuestro de carbono. La mayor capacidad de retención de nutrientes y agua puede explicar los incrementos en la productividad observados en muchos estudios. Estos beneficios son atribuibles principalmente a la reducción de la perturbación del suelo, lo que favorece una mayor acumulación de materia orgánica y una estructura del suelo más eficiente.

No obstante, los resultados encontrados en algunos estudios, que muestran una menor productividad bajo estos sistemas, pueden estar relacionados con problemas específicos, como la compactación del suelo. Este problema puede limitar el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes, afectando negativamente la productividad (Naab et al., 2017; Ozpinar & Ozpinar, 2015; Shahzad et al., 2016; Wang et al., 2015). La compactación del suelo es altamente dependiente de las condiciones climáticas, el tipo de suelo y los cultivos utilizados en las rotaciones. Por lo tanto, es crucial considerar estos factores al implementar prácticas de labranza conservacionista para asegurar que se maximicen los beneficios potenciales (Jabro et al., 2021). Aunque la mayoría de los estudios apoyan la adopción de sistemas de labranza conservacionista como una alternativa más sostenible para mejorar la productividad agrícola, es fundamental reconocer y abordar las condiciones específicas que pueden afectar su efectividad. La integración de prácticas adaptativas y específicas del sitio es esencial para optimizar los beneficios de estas prácticas en diferentes contextos agrícolas.

CONCLUSIÓN

Existe una preocupación global sobre el impacto de las prácticas de labranzas en la calidad del suelo y la productividad agrícola. Se destacan métodos como la siembra directa con rotación de cultivos, especialmente con introducción de abonos verdes en los sistemas, como estrategias clave para mejorar la calidad del suelo y potenciar la producción de alimentos.

La investigación revela un creciente interés científico en las prácticas de labranzas conservacionista, con Estados

Unidos, China, Brasil, Canadá e India a la vanguardia en publicaciones. Estos estudios muestran mejoras en los indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo con estas prácticas. Sin embargo, los resultados varían, especialmente en relación con la compactación del suelo, influenciada por factores regionales.

Para avanzar en la comprensión de los impactos de las prácticas de labranzas en la calidad del suelo y la productividad agrícola, es necesario investigar más a fondo varios aspectos clave. Se deben realizar investigaciones a nivel nacional de las exigencias edafoclimáticas de los diferentes cultivos para identificar las condiciones en las cuales los sistemas conservacionistas pueden ser más efectivos. Además, es necesario fomentar la colaboración internacional a través del intercambio de datos y experiencias para desarrollar y adaptar estrategias resilientes y sostenibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, A., Arif, M. S., Shahzad, S. M., Yasmeen, T., Shakoar, A., Iqbal, S., Riaz, A., Zahid, A., & Chapman, S. J. (2024). Long-term raw crop residue but not burned residue incorporation improved soil multifunctionality in semi-arid agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 240(February), 106073. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106073>
- Ahmed, A., & Basir, A. (2023). Impact of Cropping System and Planting Techniques On Soil Properties and Wheat Productivity Under Rainfed Condition. *Gesunde Pflanzen*, 261–268. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00932-2>
- Al-Shammari, A. A. G., Al-Shihmani, L. S. S., Caballero-Calvo, A., & Fernández-Gálvez, J. (2023). Impact of agronomic practices on physical surface crusts and some soil technical attributes of two winter wheat fields in southern Iraq. *Journal of Soils and Sediments*, 23(11), 3917–3936. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03585-w>

- Al-Shammary, A. A. G., Al-Shihmani, L. S. S., Fernández-Gálvez, J., & Caballero-Calvo, A. (2024). Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impacts on soil attributes. *Journal of Environmental Management*, 364(February). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121487>
- Alam, M. K., Islam, M. M., Salahin, N., & Hasanuzzaman, M. (2014). Effect of tillage practices on soil properties and crop productivity in wheat-mungbean-rice cropping system under subtropical climatic conditions. *Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/437283>
- Ali, A. B., Elshaikh, N. A., Hong, L., Adam, A. B., & Haofang, Y. (2017). Conservation tillage as an approach to enhance crops water use efficiency. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 67(3), 252–262. <https://doi.org/10.1080/09064710.2016.1255349>
- Alijani, K., Bahrani, M. J., Kazemeini, S. A., & Yasrebi, J. (2021). Soil and Sweet Corn Quality Responses to Tillage, Residue, and Nitrogen Management in Southern Iran. *International Journal of Plant Production*, 15(1), 139–150. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00127-z>
- Araya, T., Nyssen, J., Govaerts, B., Deckers, J., Sommer, R., Bauer, H., Gebrehiwot, K., & Cornelis, W. M. (2016). Seven years resource-conserving agriculture effect on soil quality and crop productivity in the Ethiopian drylands. *Soil and Tillage Research*, 163, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.011>
- Babu, S., Singh, R., Avasthe, R., Rathore, S. S., Kumar, S., Das, A., Layek, J., Sharma, V., Wani, O. A., & Singh, V. K. (2023). Conservation tillage and diversified cropping enhance system productivity and eco-efficiency and reduce greenhouse gas intensity in organic farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1114617>
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326(December 2017), 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas. (2024). Datos abiertos. Disponible en: <https://capeco.org.py/ranking-mundial-es/>
- Chahal, I., Hooker, D. C., Deen, B., Janovicek, K., & Van Eerd, L. L. (2021). Long-term effects of crop rotation, tillage, and fertilizer nitrogen on soil health indicators and crop productivity in a temperate climate. *Soil and Tillage Research*, 213, 105121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105121>
- Chandio, F. A., Yaoming, L., Shaikh, S. A., Zheng, M., & Korai, P. K. (2018). *Effect of Straw Incorporation By Tillage Implements Combination on Physico-Chemical Properties of Soil and Maize Productivity in*. 27(11), 7527–7535.
- Chaudhary, A., Meena, M. C., Dwivedi, B. S., Datta, S. P., Parihar, C. M., Dey, A., & Sharma, V. K. (2019). Effect of conservation agriculture on soil fertility in maize (*Zea mays*)-based systems. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 89(10), 1654–1659. <https://doi.org/10.56093/ijas.v89i10.94599>
- Chen, N., Zhao, X., Dou, S., Deng, A., Zheng, C., Cao, T., Song, Z., & Zhang, W. (2023). The Tradeoff between Maintaining Maize (*Zea mays* L.) Productivity and Improving Soil Quality under Conservation Tillage Practice in Semi-Arid Region of Northeast China. *Agriculture (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/agriculture13020508>
- Chen, S., Yao, F., Mi, G., Wang, L., Wu, H., & Wang, Y. (2022). Crop rotation increases root biomass and promotes the correlation of soil dissolved carbon with the microbial community in the rhizosphere. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10(December), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1081647>
- Cherubin, M. R., & Schiebelbein, B. E. (2022). Saúde do solo: múltiplas perspectivas e percepções. In *Saúde do solo: múltiplas perspectivas e percepções*. <https://doi.org/10.11606/9786587391342>
- Cui, Y., Zhang, W., Zhang, Y., Liu, X., Zhang, Y., Zheng, X., Luo, J., & Zou, J. (2022). Effects of no-till on upland crop yield and soil organic carbon: a global meta-analysis. *Plant and Soil*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05854-y>
- Dam, R. F., Mehdi, B. B., Burgess, M. S. E., Madramootoo, C. A., Mehuys, G. R., & Callum, I. R. (2005). Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil and Tillage Research*, 84(1), 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.006>
- Das, A., Ghosh, P. K., Lal, R., Saha, R., & Ngachan, S. (2017). Soil Quality Effect of Conservation Practices in Maize–Rapeseed Cropping System in Eastern Himalaya. *Land Degradation and Development*, 28(6), 1862–1874. <https://doi.org/10.1002/ldr.2325>
- Debiasi, H., Monteiro, J. E. B. De A., Franchini, J. C., Farias, J. R. B., Conte, O., Cunha, G. R. Da, Moraes, M. T. De, Balbinot Junior, A. A., Silva, F. A. M. Da, Evangelista, B. A., & Marafon, A. C. (2022). *Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja*. 137. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1148652/1/DOCUMENTO-447-final.pdf>
- Demir, O., & Gözübüyük, Z. (2020). A comparison of different tillage systems in irrigated conditions by risk and gross margin analysis in Erzurum region of Turkey.

- Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 2529–2544. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00308-5>
- Díaz-Zorita, M., Grove, J. H., Murdock, L., Herbeck, J., & Perfect, E. (2004). Soil structural disturbance effects on crop yields and soil properties in a no-till production system. *Agronomy Journal*, 96(6), 1651–1659. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1651>
- Dixit, A. K., Agrawal, R. K., Das, S. K., Sahay, C. S., Choudhary, M., Rai, A. K., Kumar, S., Kantwa, S. R., & Palsaniya, D. R. (2019). Soil properties, crop productivity and energetics under different tillage practices in fodder sorghum + cowpea-wheat cropping system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(4), 492–506. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1507024>
- Du, C., Li, L., Xie, J., Effah, Z., Luo, Z., & Wang, L. (2023). Long-Term Conservation Tillage Increases Yield and Water Use Efficiency of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) by Regulating Substances Related to Stress on the Semi-Arid Loess Plateau of China. *Agronomy*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy13051301>
- FAO. (2011). How to Feed the World in 2050. *Archiv Fur Kriminologie*, 228(5–6), 151–159.
- FAO. (2022). Sustainable soil management in action. *Global Soil Partnership*.
- Farhangi-Abriz, S., Ghassemi-Golezani, K., & Torabian, S. (2021). A short-term study of soil microbial activities and soybean productivity under tillage systems with low soil organic matter. *Applied Soil Ecology*, 168(June), 104122. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104122>
- Hassani, K. K., Rachid, M., Bouamar, B., Abdelmjid, Z., Houria, D., Hassnae, M., & Abdelhak, B. (2024). Effect of No Tillage and Conventional Tillage on Wheat Grain Yield Variability: A Review. *Journal of Environmental and Earth Sciences*, 6(1), 57–70. <https://doi.org/10.30564/jees.v6i1.6172>
- Hou, X., Li, R., Jia, Z., Han, Q., Wang, W., & Yang, B. (2012). Effects of rotational tillage practices on soil properties, winter wheat yields and water-use efficiency in semi-arid areas of north-west China. *Field Crops Research*, 129, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.021>
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers: Synthesis Report. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1–34.
- Jabro, J. D., Stevens, W. B., Iversen, W. M., Sainju, U. M., & Allen, B. L. (2021). Soil cone index and bulk density of a sandy loam under no-till and conventional tillage in a corn-soybean rotation. *Soil and Tillage Research*, 206(July 2020), 104842. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104842>
- Jat, M. L., Gathala, M. K., Saharawat, Y. S., Tetarwal, J. P., Gupta, R., & Yadvinder-Singh. (2013). Double no-till and permanent raised beds in maize-wheat rotation of north-western Indo-Gangetic plains of India: Effects on crop yields, water productivity, profitability and soil physical properties. *Field Crops Research*, 149, 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.04.024>
- Khan, A., Jan, M. T., Afzal, M., Muhammad, I., Jan, A., & Shah, Z. (2015). An integrated approach using organic amendments under a range of tillage practices to improve wheat productivity in a cereal based cropping system. *International Journal of Agriculture and Biology*, 17(3), 467–474. <https://doi.org/10.17957/IJAB/17.3.13.248>
- Khan, S., Shah, A., Nawaz, M., & Khan, M. (2017). Impact of different tillage practices on soil physical properties, nitrate leaching and yield attributes of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 240–252. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000019>
- Khokhar, A., Bhat, M. A., Singh, M. J., Yousuf, A., Sharma, V., & Sandhu, P. S. (2022). Soil Properties, Nutrient Availability vis-à-vis Uptake and Productivity of Rainfed Maize-Wheat System in Response to Long-Term Tillage and N Management in Northwest India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(22), 2935–2954. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2096897>
- Kooch, Y., Kartalaei, Z. M., Amiri, M., Zarafshar, M., Shabani, S., & Mohammady, M. (2024). Soil health reduction following the conversion of primary vegetation covers in a semi-arid environment. *Science of the Total Environment*, 921(January), 171113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171113>
- Kumar, R., Pandey, D. S., & Singh, V. P. (2014). Wheat (*Triticum aestivum*) productivity under different tillage practices and legume options in rice (*Oryza sativa*) and wheat cropping sequence. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 84(1), 101–106. <https://doi.org/10.56093/ijas.v84i1.37164>
- Kumar, S., Shivani, Mishra, S., & Singh, V. P. (2006). Effect of tillage and irrigation on soil-water-plant relationship and productivity of winter maize (*Zea mays*) in north Bihar. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 76(9), 526–530.
- Leharwan, M., Kumar, Y., Kumar, R., Kumar Saraswat, P., Kumar, R., Kumar Thaliyil Veetil, A., Bhattacharjee, S., Kumar, A., & Kumar, S. (2023). Assessing the Effects of Conservation Tillage and In-Situ Crop Residue Management on Crop Yield and Soil Properties in Rice-Wheat Cropping System. *Sustainability (Switzerland)*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/su151712736>
- Liu, S., Zhang, X. Y., Kravchenko, Y., & Iqbal, M. A. (2015).

- Maize (*Zea mays* L.) yield and soil properties as affected by no tillage in the black soils of China. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 65(6), 554–565. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1036304>
- Liu, S., Zhang, X. Y., Yang, J., & Drury, C. F. (2013). Effect of conservation and conventional tillage on soil water storage, water use efficiency and productivity of corn and soybean in Northeast China. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 63(5), 383–394. <https://doi.org/10.1080/09064710.2012.762803>
- Liu, W. X., Liu, W. S., Yang, M. Y., Wei, Y. X., Chen, Z., Virk, A. L., Lal, R., Zhao, X., & Zhang, H. L. (2023). Effects of tillage and cropping sequences on crop production and environmental benefits in the North China Plain. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 17629–17643. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23371-4>
- Mathers, C., Heitman, J., Huseeth, A., Locke, A., Osmond, D., & Woodley, A. (2023). No-till imparts yield stability and greater cumulative yield under variable weather conditions in the southeastern USA piedmont. *Field Crops Research*, 292(February 2022), 108811. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108811>
- Michael, K., Monicah, M. M., Peter, B., & Job, K. (2021). Optimizing interaction between crop residues and inorganic N under zero tillage systems in sub-humid region of Kenya. *Heliyon*, 7(9), e07908. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07908>
- Mitchell, J. P., Carter, L. M., Reicosky, D. C., Shrestha, A., Pettygrove, G. S., Klonsky, K. M., Marcum, D. B., Chessman, D., Roy, R., Hogan, P., & Dunning, L. (2016). A history of tillage in California's Central Valley. *Soil and Tillage Research*, 157, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.015>
- Mitchell, J. P., Shrestha, A., Mathesius, K., Scow, K. M., Southard, R. J., Haney, R. L., Schmidt, R., Munk, D. S., & Horwath, W. R. (2017). Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA. *Soil and Tillage Research*, 165, 325–335. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.001>
- Mu, X., Zhao, Y., Liu, K., Ji, B., Guo, H., Xue, Z., & Li, C. (2016). Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 78, 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.04.010>
- Naab, J. B., Mahama, G. Y., Yahaya, I., & Prasad, P. V. V. (2017). Conservation agriculture improves soil quality, crop yield, and incomes of smallholder farmers in north western Ghana. *Frontiers in Plant Science*, 8(June), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00996>
- Ozpinar, S. (2010). Changes in soil physical properties in response to maize tillage management on a clay loam soil. *Philippine Agricultural Scientist*, 93(3), 337–345.
- Ozpinar, S., & Ozpinar, A. (2015). Tillage effects on soil properties and maize productivity in western Turkey. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(7), 1029–1040. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.978302>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Parihar, C. M., Jat, S. L., Singh, A. K., Datta, A., Parihar, M. D., Varghese, E., Bandyopadhyay, K. K., Nayak, H. S., Kuri, B. R., & Jat, M. L. (2018). Changes in carbon pools and biological activities of a sandy loam soil under medium-term conservation agriculture and diversified cropping systems. *European Journal of Soil Science*, 69(5), 902–912. <https://doi.org/10.1111/ejss.12680>
- Parihar, C. M., Singh, A. K., Jat, S. L., Dey, A., Nayak, H. S., Mandal, B. N., Saharawat, Y. S., Jat, M. L., & Yadav, O. P. (2020). Soil quality and carbon sequestration under conservation agriculture with balanced nutrition in intensive cereal-based system. *Soil and Tillage Research*, 202(April), 104653. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104653>
- Pooniya, V., Biswakarma, N., Parihar, C. M., Swarnalakshmi, K., Lama, A., Zhiipao, R. R., Nath, A., Pal, M., Jat, S. L., Satyanarayana, T., Majumdar, K., Jat, R. D., Shivay, Y. S., Kumar, D., Ghasal, P. C., & Singh, K. (2021). Six years of conservation agriculture and nutrient management in maize–mustard rotation: Impact on soil properties, system productivity and profitability. *Field Crops Research*, 260(June 2020), 108002. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108002>
- Pramanick, B., Kumar, M., Naik, B. M., Kumar, M., Singh, S. K., Maitra, S., Naik, B. S. S., Rajput, V. D., & Minkina, T. (2022). Long-Term Conservation Tillage and Precision Nutrient Management in Maize–Wheat Cropping System: Effect on Soil Properties, Crop Production, and Economics. *Agronomy*, 12(11), 1–17. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112766>
- Prasad, D., Rana, D. S., Babu, S., Choudhary, A. K., & Rajpoot, S. (2016). Influence of tillage practices and crop diversification on productivity and soil health in maize (*Zea mays*)/soybean (*Glycine max*) based cropping systems. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 86(1), 96–102. <https://doi.org/10.56093/ijas.v86i1.55238>
- Ram, H., Kumar, R., Meena, R. K., Malik, R., Mallikarjun, M., & Saxena, A. (2022). Effect of tillage and nitrogen

- management on yields, profitability and nitrogen balance of baby corn (*Zea mays*). *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 92(2), 263–266. <https://doi.org/10.56093/ijas.v92i2.122249>
- Roy, D., Datta, A., Jat, H. S., Choudhary, M., Sharma, P. C., Singh, P. K., & Jat, M. L. (2021). Impact of long term conservation agriculture on soil quality under cereal based systems of North West India. *Geoderma*, 405(October 2020), 115391. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115391>
- Saha, R., & Ghosh, P. K. (2013). Soil organic carbon stock, moisture availability and crop yield as influenced by residue management and tillage practices in maize-mustard cropping system under hill agro-ecosystem. *National Academy Science Letters*, 36(5), 461–468. <https://doi.org/10.1007/s40009-013-0158-7>
- Salem, H. M., Meselhy, A., Elhagarey, M., Ali, A. M., & Wu, W. (2022). Soil erosion control and wheat productivity are improved by a developed ridge-furrow and reservoir tillage systems. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(2), 273–282. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1832655>
- Salem, H. M., Valero, C., Muñoz, M. Á., Rodríguez, M. G., & Silva, L. L. (2015). Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield. *Geoderma*, 237–238, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.014>
- Sarker, M. R., Galdos, M. V., Challinor, A. J., Huda, M. S., Chaki, A. K., & Hossain, A. (2022). Conservation tillage and residue management improve soil health and crop productivity—Evidence from a rice-maize cropping system in Bangladesh. *Frontiers in Environmental Science*, 10(October), 1–26. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.969819>
- Shahzad, M., Farooq, M., Jabran, K., Yasir, T. A., & Hussain, M. (2016). Influence of various tillage practices on soil physical properties and wheat performance in different wheat-based cropping systems. *International Journal of Agriculture and Biology*, 18(4), 821–829. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0178>
- Sharma, P., Abrol, V., Sankar, G. R. M., & Singh, B. (2009). Influence of tillage practices and mulching options on productivity, economics and soil physical properties of maize (*Zea mays*)-wheat (*Triticum aestivum*) system. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 79(11), 865–870.
- Singh, R., Babu, S., Avasthe, R. K., Meena, R. S., Yadav, G. S., Das, A., Mohapatra, K. P., Rathore, S. S., Kumar, A., & Singh, C. (2021). Conservation tillage and organic nutrients management improve soil properties, productivity, and economics of a maize-vegetable pea system in the Eastern Himalayas. *Land Degradation and Development*, 32(16), 4637–4654. <https://doi.org/10.1002/ldr.4066>
- Solomon, N., Birhane, E., Tilahun, M., Schauer, M., Gebremedhin, M. A., Gebremariam, F. T., Gidey, T., & Newete, S. W. (2024). Revitalizing Ethiopia's highland soil degradation: a comprehensive review on land degradation and effective management interventions. *Discover Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00282-7>
- Sun, J., Niu, W., Du, Y., Zhang, Q., Li, G., Ma, L., Zhu, J., Mu, F., Sun, D., Gan, H., Siddique, K. H. M., & Ali, S. (2023). Combined tillage: A management strategy to improve rainfed maize tolerance to extreme events in northwestern China. *Agricultural Water Management*, 289(September). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108503>
- Thiengo, C., De Souza, G., Villalba Algarin, C. A., da Silva, D., & De Sá, E. (2024). Effects of soil tillage practices on soil conservation in pasture - based integrated management systems : a case study on steep slopes in southeastern Brazil. *Discover Soil*. <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00026-z>
- Tyagi, A., & Haritash, A. K. (2024). Climate-smart agriculture, enhanced agroproduction, and carbon sequestration potential of agroecosystems in India: a meta-analysis. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 2019(ESI 2020). <https://doi.org/10.1007/s13412-024-00917-1>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Vieira, M. E. O., Lopes, L. D., Costa, F. M., Talamini, V., Pacheco, E. P., & Fernandes, M. F. (2024). Different no-till grain production systems with *Urochloa* spp. affect soil microbial community structure, biomass and activity in a tropical Ultisol. *Soil Ecology Letters*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42832-023-0191-5>
- Vilakazi, B. S., Zengeni, R., & Mafongoya, P. (2022). Selected Soil Physicochemical Properties under Different Tillage Practices and N Fertilizer Application in Maize Mono-Cropping. *Agriculture (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/agriculture12101738>
- Villalba Algarin, C. A., Ramírez Paniagua, I. R., Sanabria Franco, M. F., & da Silva, C. D. (2024). Comportamiento agronómico bajo diferentes densidades de siembra del sésamo negro (*Sesamum indicum* L.) en la Región Sur del Paraguay. *Investigación Agraria*, 26(1), 22–28. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2024.junio.2601768>
- Wakwoya, M. B., Woldeyohannis, W. H., & Yimamu, F. K. (2022). Effects of minimum tillage and liming on maize (*Zea mays* L.) yield components and selected properties of acid soils in Assosa Zone, West Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8(October 2021), 100301. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100301>

- Wang, X., Zhou, B., Sun, X., Yue, Y., Ma, W., & Zhao, M. (2015). Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status. *PLoS ONE*, 10(6), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129231>
- Yadav, M. R., Parihar, C. M., Jat, S. L., Singh, A. K., Kumar, R., Yadav, R. K., Kuri, B. R., Parihar, M. D., Yadav, B., Verma, A. P., & Jat, M. L. (2017). Long term effect of legume intensified crop rotations and tillage practices on productivity and profitability of maize vis-a-vis soil fertility in North-Western Indo-Gangetic Plains of India. *Legume Research*, 40(2), 282–290. <https://doi.org/10.18805/lr.v0i0.7583>
- Yerli, C., Sahin, U., Ors, S., & Kiziloglu, F. M. (2023). Improvement of water and crop productivity of silage maize by irrigation with different levels of recycled wastewater under conventional and zero tillage conditions. *Agricultural Water Management*, 277(December 2022), 108100. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108100>
- Zhang, B., Jia, Y., Fan, H., Guo, C., Fu, J., Li, S., Li, M., Liu, B., & Ma, R. (2024). Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. *Land Degradation and Development*, 35(10), 3256–3273. <https://doi.org/10.1002/ldr.5144>
- Zhang, L., Wang, J., Fu, G., & Zhao, Y. (2018). Rotary tillage in rotation with plowing tillage improves soil properties and crop yield in a wheat-maize cropping system. *PLoS ONE*, 13(6), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198193>
- Zhang, Q., Wang, S., Zhang, Y., Li, H., Liu, P., Wang, R., Wang, X., & Li, J. (2021). Effects of subsoiling rotational patterns with residue return systems on soil properties, water use and maize yield on the semiarid Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 214(August), 105186. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105186>
- Zhang, X., Wang, J., Feng, X., Yang, H., Li, Y., Yakov, K., Liu, S., & Li, F. M. (2023). Effects of tillage on soil organic carbon and crop yield under straw return. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 354(May), 108543. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108543>
- Zhang, Y., Wang, S., Wang, H., Ning, F., Zhang, Y., Dong, Z., Wen, P., Wang, R., Wang, X., & Li, J. (2018). The effects of rotating conservation tillage with conventional tillage on soil properties and grain yields in winter wheat-spring maize rotations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263(December 2017), 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.012>
- Zhao, H., Qin, J., Gao, T., Zhang, M., Sun, H., Zhu, S., Xu, C., & Ning, T. (2022). Immediate and long-term effects of tillage practices with crop residue on soil water and organic carbon storage changes under a wheat-maize cropping system. *Soil and Tillage Research*, 218(January 2021), 105309. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105309>