

Artículo:

Importancia de la gestión del pastoreo sobre la ecología del suelo

Importance of Grass management on soil ecology

Jaime Neftalí Márquez-Godoy^{1*}, Edith Ramírez-Segura², Jonathan R. Garay-Martínez³, Alejandro Espinoza-Canales⁴, Luis Cuauhtémoc Muñoz Salas⁴

Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social

Recibido: 15 de julio de 2025
Aceptado: 10 de septiembre de 2025
Publicado: 20 de noviembre de 2025

Publicación continua editada por el **Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca**

Desv. Lindero Tametate, S/N
Col. La Morita
C.P. 92100
Tantoyuca, Veracruz, México.
Teléfono: 789 8931680, Ext.196.

Correo electrónico:
revistadigital@itsta.edu.mx

Sitio WEB
<https://itsta.edu.mx/revistadigital>

ISSN 2448-8003
Reserva de derechos al uso exclusivo
No. 04-2016-092313253300-203

Editor responsable:
Dr. Horacio Bautista Santos

Copyright: Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

- ¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de Culiacán, Culiacán, Sinaloa, México.
- ² INIFAP, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Agricultura Familiar (CENID-AF), Ojuelos, Jalisco, México.
- ³ INIFAP, Campo Experimental las Huastecas, Altamira, Tamaulipas, México.
- ⁴ Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Medicina Veterinaria, Zacatecas, México.

* Autor corresponsal: marquez.jaime@inifap.gob.mx

Resumen: La ecología de las tierras de pastoreo está influenciada por la salud del suelo. Esta revisión ofrece información resumida de estudios sobre como un manejo adecuado de las prácticas de pastoreo mejora las propiedades del suelo como son la infiltración de agua, la producción de materia orgánica, el secuestro de carbono, nitrógeno y el ciclo de diferentes nutrientes. En esta revisión se analizan los impactos de estrategias de manejo que se utilizan frecuentemente en tierras de pastoreo, incluyendo ajuste de carga animal y sistemas de pastoreo. En general, la implementación de buenas prácticas de manejo y un ajuste de carga animal de liviano a moderado y un sistema de pastoreo rotativo, tiende a beneficiar las propiedades del suelo. Por tal motivo, se debe de considerar un plan de manejo integrado para mejorar la salud del suelo y la productividad del ecosistema. Esta revisión proporciona un conocimiento general sobre cómo la gestión de las tierras de pastoreo afecta los procesos edáficos relacionados con la salud del suelo.

Palabras clave: Cambio climático, ciclado de nutrientes, estabilidad, macro y mesofauna.

Abstract

Rangeland ecology is influenced by soil health. This review provides summarized information from studies on how proper grazing practices improve soil properties such as water infiltration, organic matter production, carbon and nitrogen sequestration, and the cycling of various nutrients. This review analyzes the impacts of frequently used management strategies on rangelands, including stocking rate adjustment and grazing systems. In general, the implementation of good management practices, light to moderate stocking rate adjustment, and rotational grazing tend to benefit soil properties. Therefore, an integrated management plan should be considered to improve soil health and ecosystem productivity. This review provides a general understanding of how rangeland management affects soil processes related to soil health.

Keywords: climate change, nutrient cycle, stability, macro and mesofauna.

Introducción

El pastoreo de ganado bovino ocupa aproximadamente el 45% de la superficie terrestre, siendo una de las principales actividades productivas a nivel mundial (Follett y Reed, 2010). Sin embargo, su manejo inadecuado ha generado impactos negativos en el ecosistema, afectando directamente la salud del suelo y los servicios ecosistémicos (Xu et al., 2018). Dlamini et al. (2016) mencionaron que la mala gestión del pastoreo ha provocado que las reservas de carbono orgánico en el suelo (COS) se reduzcan un 16 % en climas secos y un 8 % en climas húmedos. Por esta razón, la gestión del pastoreo es un aspecto crucial para asegurar que el ganado bovino no solo se mantenga como una fuente de recursos, sino que también contribuya a la preservación de los ecosistemas naturales (Erb et al., 2016).

El suelo es un recurso finito y susceptible a procesos de degradación, especialmente bajo condiciones de uso intensivo y prácticas de manejo inadecuadas. El pisoteo constante del ganado, el sobrepastoreo, la falta de rotación de potreros y la eliminación excesiva de cobertura vegetal pueden llevar a una disminución drástica de la fertilidad del suelo, mayor susceptibilidad a la erosión y pérdida de su estructura y capacidad de retención de agua (Zhan et al., 2020; Milazzo et al., 2023). Estas alteraciones no solo afectan la productividad del ecosistema, sino que también inciden negativamente en el ciclo hidrológico y en la captura de carbono, incrementando la vulnerabilidad del sistema frente al cambio climático (Milazzo et al., 2023).

La gestión del pastoreo se refiere al conjunto de prácticas que buscan optimizar las prácticas ganaderas, minimizando el impacto sobre el suelo y promoviendo la regeneración natural del ecosistema. Un aspecto clave en la gestión del pastoreo es el ajuste de carga animal la cual permite determinar el número de animales que puede soportar un predio ganadero sin afectar su salud y productividad (Villa-Herrera et al., 2014). Al mantener un ajuste de carga animal adecuado, se evita la sobreexplotación de los recursos naturales y permite que la vegetación se recupere y se genere una protección del suelo contra el proceso de erosión entre periodos de pastoreo (Galván et al., 2018). De igual forma, la rotación de potreros es otra práctica importante en la gestión del pastoreo que puede tener beneficios significativos para la salud del ecosistema y la fertilidad del suelo (Lawrence et al., 2019). En lugar de permitir que los animales pastoreen continuamente en un lugar, la rotación de potreros implica dividir el área de pastoreo en secciones más pequeñas y mover periódicamente el ganado entre ellas (Chen y Shi, 2018). Lawrence et al. (2019) evaluaron la alteración de la composición de pastos y la cobertura del suelo bajo dos sistemas de pastoreo (rotativo y continuo), y encontraron que bajo un pastoreo rotativo la cobertura de especies herbáceas perennes aumento aproximadamente un 19 % y redujo 14 % la cobertura de plantas anuales. Por su parte, Kazemi et al. (2018) mencionaron que con un pastoreo de rotación con largos periodos de descanso se puede mantener las propiedades químicas (pH, K, Ca y Mg) del suelo en buen balance, lo que promueve un aumento en los nutrientes del suelo y evita su compactación. Al implementar estrategias de manejo planificadas, es posible mantener o incluso mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que a su vez contribuye a la estabilidad ecológica del ecosistema. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es analizar la importancia de la gestión del pastoreo de ganado bovino sobre las principales variables ecológicas del suelo.

Materiales y métodos

Esta investigación se desarrolló como una revisión narrativa de la literatura científica con el propósito de sintetizar y analizar la evidencia existente sobre la influencia de la gestión del pastoreo bovino en la ecología del suelo. La estrategia para la recopilación de la literatura se fundamentó en una búsqueda sistemática en bases de datos académicas indexadas, entre las que se incluyeron Scopus, Web of Science, Google Académico y ScienceDirect. La

selección de los estudios se rigió por criterios de inclusión predefinidos, que priorizaron investigaciones primarias y revisiones, publicadas en revistas con revisión por pares, que evaluaran explícitamente el impacto de diferentes prácticas e intensidades de pastoreo sobre variables físicas, químicas y biológicas del suelo.

El proceso de análisis y síntesis de la información se ejecutó mediante un enfoque cualitativo y temático. La evidencia extraída de la literatura seleccionada fue organizada y clasificada en categorías analíticas clave para facilitar una discusión estructurada. Dichas categorías abarcaron el impacto sobre el microbioma del suelo, la estructura física del mismo, los procesos de captura de carbono y la dinámica de los ciclos de nutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo y potasio. La síntesis se centró en la identificación de consensos, tendencias generales y contradicciones en la literatura, con especial atención a la magnitud y dirección de los efectos reportados en función del sistema de manejo evaluado.

Resultados y Discusión

Impacto del pastoreo sostenible en el microbioma del suelo

El microbioma del suelo es una comunidad extensa y compleja de microorganismos que incluyen bacterias, hongos, algas, arqueas, líquenes y briofitas, los cuales desempeñan un papel esencial en la salud de los ecosistemas terrestres (Márquez-Godoy y González-Escobedo, 2022). Estos microorganismos son los encargados de descomponer la materia orgánica y reciclar nutrientes (carbono y nitrógeno) ayudando a mantener la fertilidad del suelo, la productividad de las especies forrajeras y mejorando la estabilidad ecológica del ecosistema (Saccá et al., 2017; Yadav et al., 2021). Por tal motivo, la correcta gestión del pastoreo de ganado bovino es esencial para mantener o mejorar la salud del suelo y garantizar la seguridad alimentaria (Figura 1).

El pastoreo es una actividad que implica el manejo del ganado en los pastizales, por tal motivo, puede tener impactos significativos en la estructura y función del suelo (Wang et al., 2023). Las prácticas de pastoreo intensivas caracterizadas por altas densidades de animal y escaso tiempo de descanso, pueden llevar a la pérdida de la estructura y calidad del suelo (Zhang et al., 2022; Wang et al., 2023), lo que a su vez afecta negativamente al microbioma del suelo. Zhao et al. (2017) realizaron un análisis donde evaluaron la comunidad microbiana, bacteriana y fúngica del suelo a diferentes intensidades de pastoreo (ligero, moderado e

intenso). Estos autores concluyeron que el pastoreo intenso redujo significativamente a la comunidad microbiana en un 14.79 %, en 16.48 % la bacteriana y 28.12 % la fúngica, mientras que el pastoreo ligero y moderado no causó ningún efecto en estas comunidades.

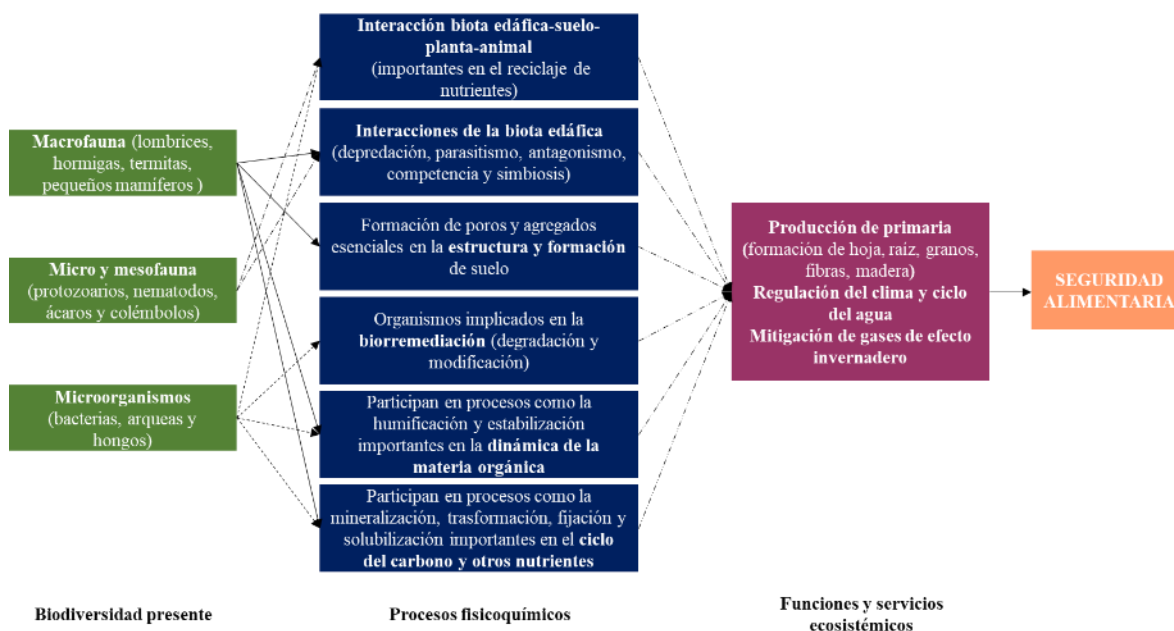


Figura 1. Biodiversidad del suelo y su impacto en características edafoclimáticas para garantizar la seguridad alimentaria. Fuente: Tomada de El Mujtar et al. (2019).

Esta disminución de la diversidad microbiana se debe a la reducción en la permeabilidad y la alta compactación del suelo bajo altas concentraciones de ganado que inhiben la actividad metabólica microbiana y disminuye la diversidad microbiana del suelo (Jeffery et al., 2009; Li et al., 2020).

Con una disminución significativa en estas comunidades, el proceso de descomposición de la materia orgánica (MO) y el ciclo de nutrientes puede ralentizarse ocasionando una reducción en la fertilidad del suelo y menor disponibilidad de nutrientes para las plantas. Por otra parte, la estructura del suelo puede degradarse, resultando en una menor capacidad de retención de agua y una mayor susceptibilidad a la erosión (El Mujtar et al., 2019).

Por otro lado, investigaciones recientes sugieren que un pastoreo de ganado bien administrado (número de animales área^{-1}) con periodos de descanso adecuados entre eventos de pastoreo puede incrementar la diversidad microbiana del suelo (Döbert et al., 2021; Khatri-Chhetri et al., 2022). Por ejemplo, Khatri-Chhetri et al. (2024) compararon el efecto

del pastoreo adaptativo en múltiples potreros y el pastoreo convencional en las comunidades microbianas del suelo. Estos autores descubrieron que la riqueza bacteria fue mayor en el pastoreo adaptativo (3944) frente al pastoreo convencional (3783). De manera similar, el índice de uniformidad de Pielous's para hongos fue significativamente más alto (0.7) en pastoreo adaptativo que en pastoreo convencional (0.6), al igual que la diversidad Alpha (Shannon) la cual fue mayor en el pastoreo adaptativo (4.5) que en el convencional (3.8). Por tal motivo, estos autores concluyen que el pastoreo adaptativo puede mejorar el ecosistema al mejorar la diversidad fúngica y aumentar la complejidad y conectividad de la red microbiana.

La diversidad es crucial para la resiliencia del ecosistema, ya que una mayor variedad de macroorganismos puede llevar a una mayor funcionalidad del suelo, mejorando su capacidad para mejorar la estructura física del suelo (Xia et al., 2020).

Impacto del pastoreo sobre la estructura física del suelo

El pastoreo de ganado bovino es una práctica importante para mejorar la estructura física del suelo. Este impacto se manifiesta en variables clave como porosidad (Koppe et al., 2021), formación y estabilidad de agregados del suelo (Dong et al., 2022), y la capacidad de infiltración de agua (Apfelbaum et al., 2022). Por tal motivo, es importante comprender cómo el pastoreo de ganado manejado y administrado adecuadamente puede alterar la composición del suelo y así desarrollar estrategias de manejo que mejoren la retención de agua y la resistencia a la erosión, aspectos críticos para la sostenibilidad del ecosistema (Döbert et al., 2021; Marin-Díaz et al., 2021).

La estructura del suelo es una característica crucial que determina su capacidad para sustentar el crecimiento y productividad de las especies vegetales (Khasi et al., 2024). La porosidad del suelo influye directamente en la retención de agua, aireación (Koppe et al., 2021) y la penetración de las raíces en el suelo (Bengough et al., 2016). Por otra parte, los agregados del suelo son conglomerados de partículas de suelo adheridos entre sí, los cuales juegan un papel importante en mantener la porosidad del suelo y forman una protección contra la erosión (Munkholm et al., 2016). De igual forma la infiltración de agua es esencial para recargar los mantos acuíferos y mantener la humedad del suelo (Loizeau et al., 2017; Liu et al., 2019).

El pastoreo impacta la estructura física del suelo de diversas formas, dependiendo de factores como la intensidad del pastoreo y las prácticas de manejo empleadas (Paz-Kagan et al., 2016; Byrnes et al., 2018). Por ejemplo, Lai y Kumar, (2020) evaluaron tres intensidades de pastoreo (intenso, moderado y ligero) considerando 15 propiedades del suelo y encontraron que el pastoreo intenso aumento la densidad aparente en un 11.3 % ocasionando que se reduzca la infiltración de agua en el suelo en un 10.8 %. Por otra parte, Byrnes et al. (2018) mencionaron que un pastoreo continuo y con una alta intensidad de ganado aumenta la densidad aparente del suelo (0.06, 0.12) en comparación con una intensidad moderada (0.02, 0.06). Al aumentar estas variables se dificulta el crecimiento de las plantas, además de que aumenta la posibilidad de generar problemas de erosión hídrica y eólica (Figura 2).

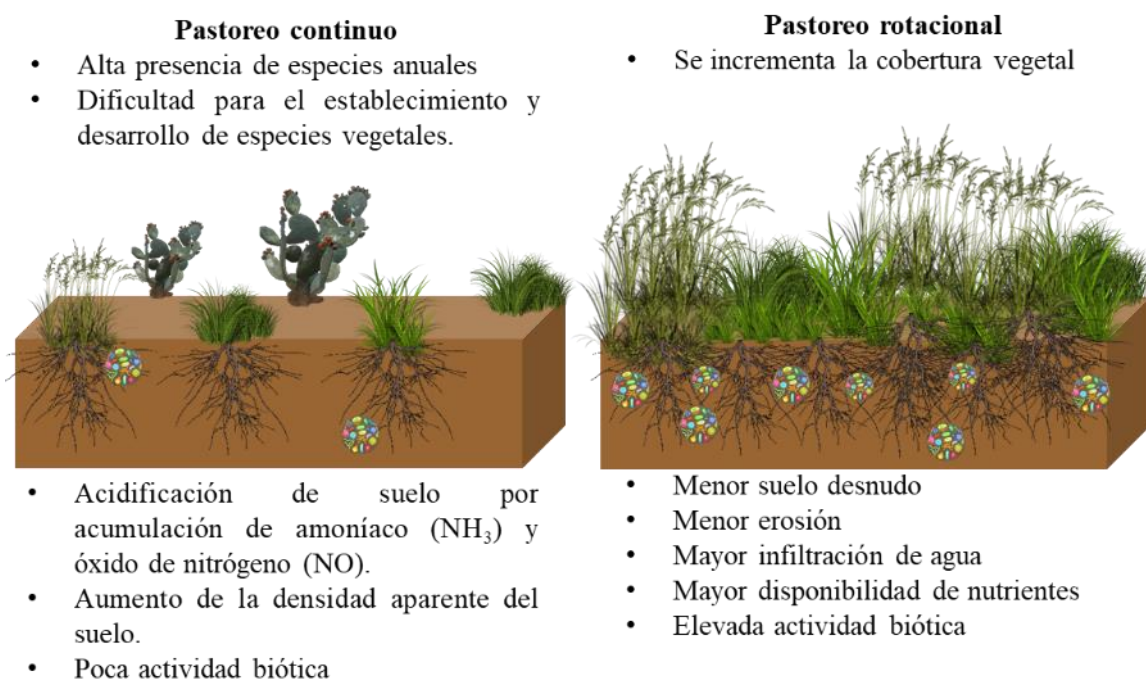


Figura 2. Efecto del pastoreo sobre la estructura del suelo.

En cambio, prácticas de pastoreo bien administradas, pueden tener efectos positivos en la estructura del suelo. Teague et al. (2011) evaluaron el efecto de diferentes prácticas de pastoreo (adaptativo en múltiples potreros, continuo ligero y continuo pesado) por nueve años en ranchos comerciales del norte de Texas y encontraron que el pastoreo adaptativo tenía menor porcentaje de suelo desnudo (1 %) en comparación con el pastoreo continuo pesado (30 %) y ligero (4 %), mientras que la estabilidad de los agregados fue mayor en el pastoreo adaptativo (93 %) que con el continuo pesado (81 %). Por otra parte, la resistencia

a la penetración del suelo fue menor en pastoreo adaptativo (174 Joules) que el continuo pesado (246 Joules). Aunado a esto, la escorrentía fue menor en el pastoreo adaptativo (1.4 cm h⁻¹) frente al continuo pesado (2.0 cm h⁻¹) y la humedad del suelo fue mayor (25 %) en el adaptativo que en el pastoreo pesado (15 %) y ligero (23%). Investigaciones similares han indicado que el pastoreo adaptativo da como resultado menos suelo desnudo, menor compactación y temperaturas de suelo más bajas, así como una mayor concentración de carbono en el suelo que el pastoreo continuo (Teague et al., 2010). Estos estudios indican que la respuesta de las propiedades del suelo al sistema de pastoreo y ajuste de carga se debe de considerar como un enfoque útil y accesible para monitorear los efectos de las decisiones de manejo del ganado sobre las condiciones de los pastizales, creando un equilibrio beneficioso entre la producción ganadera y la conservación del suelo, contribuyendo a la resiliencia de los ecosistemas frente al cambio climático (Schmalz et al., 2013).

Influencia del pastoreo en relación a la captura de carbono

El secuestro de carbono en diferentes prácticas de pastoreo es un proceso clave en la lucha contra el cambio climático, que busca mitigar la acumulación de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera al capturar y almacenar este gas en suelo (Poeplau, 2021). Esta perspectiva no solo ayuda a reducir los niveles de CO₂, sino que también mejora la salud y fertilidad del suelo, generando un beneficio doble para el medio ambiente y la ganadería (Paustian et al., 2019). Se estima que el nivel de carbono en el mundo es de 343 Petagramos (Pg C⁻¹) a una profundidad de 1 m en suelo de pastizales (Conant et al., 2017) y aproximadamente de 334 Teragramos de carbono (Tg C⁻¹) en pastizales mejorados con herbáceas (Petri et al., 2010). El pastoreo bien administrado, cuando se realiza de manera sostenible, puede transformarse en una herramienta poderosa para incrementar la materia orgánica en el suelo (MOS) y, por ende, su capacidad de secuestrar carbono en el suelo (Bieluczyk et al., 2020).

El proceso de secuestro de carbono en sistemas de pastoreo se fundamenta en la dinámica entre las plantas y el suelo. Durante el proceso de la fotosíntesis, las plantas absorben CO₂ de la atmósfera y lo convierten en carbono orgánico, el cual es almacenado en sus tejidos (Ge et al., 2012; 2015). Al ser consumidas por el ganado, parte de ese carbono se transfiere al suelo a través de la descomposición de la materia vegetal y las excreciones de los animales (Viglizzo et al., 2019).

Si bien todos los suelos tienen la capacidad de almacenar carbono, aquellos gestionados bajo prácticas bien administradas pueden tener una mejora significativa en esta capacidad. Zhang et al. (2018) evaluaron tres intensidades de pastoreo (ligero, mediano e intenso) sobre el COS y encontraron que el pastoreo ligero y moderado aumentó el COS en un 3.44 y 5.43 %, respectivamente, mientras el pastoreo intenso lo redujo un 4.30 %. En un estudio similar, Lai y Kumar (2020) investigaron 15 propiedades del suelo bajo un pastoreo ligero, moderado e intenso. Estos autores encontraron que una gestión adecuada de un pastoreo ligero el COS aumenta un 10.8 % y no se compacta el suelo. Por su parte, Cecagno et al. (2018) demostró que con un pastoreo bajo a moderado se podía aumentar el porcentaje de carbono orgánico en el suelo alrededor de $0.308 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en comparación con el pastoreo intensivo ($0.097 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Finalmente, Conant et al. (2017) menciona que una correcta administración de las prácticas de pastoreo de ganado bovino puede aumentar el carbono en el suelo de 0.105 hasta $1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La presencia de carbono en los suelos ayuda a la formación y estabilidad de agregados, lo que mejora la resistencia y estructura del suelo (Cotler et al., 2016). Este aumento en la cantidad de COS se debe a no exceder el número de unidades animal que soporta un predio ganadero, ya que de esta manera se permite que el área tenga periodos de descanso. Este descanso es crucial debido a que permite que las plantas se recuperen de un evento de pastoreo y crezcan nuevamente. A medida que van creciendo, desarrollan sistemas radiculares más profundos y densos lo que mejora la estructura del suelo, aumenta la cantidad de materia orgánica y al mismo tiempo eleva el contenido de carbono orgánico en el suelo (Figura 3). La materia orgánica que proviene de las raíces y la hojarasca que queda en el suelo, junto con el pisoteo de un pastoreo moderado ayuda a acelerar la descomposición y permite la incorporación de estos compuestos orgánicos al suelo en un ritmo más acelerado (Zhang et al., 2018).

El ciclo de nutrientes es un proceso fundamental para la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres, ya que regula la disponibilidad de elementos esenciales como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), los cuales son vitales para el crecimiento y producción de la vegetación (Sardans y Peñuelas, 2015; Hou et al., 2018). Por lo tanto, entender cómo el pastoreo de ganado bovino influye en el ciclo de nutrientes es esencial para desarrollar prácticas de manejo que equilibren la producción ganadera con la conservación de los

recursos naturales. Recientemente se ha propuesto el uso de drones para monitorear la producción de biomasa en los agostaderos y el hato (Beltran et al., 2023).

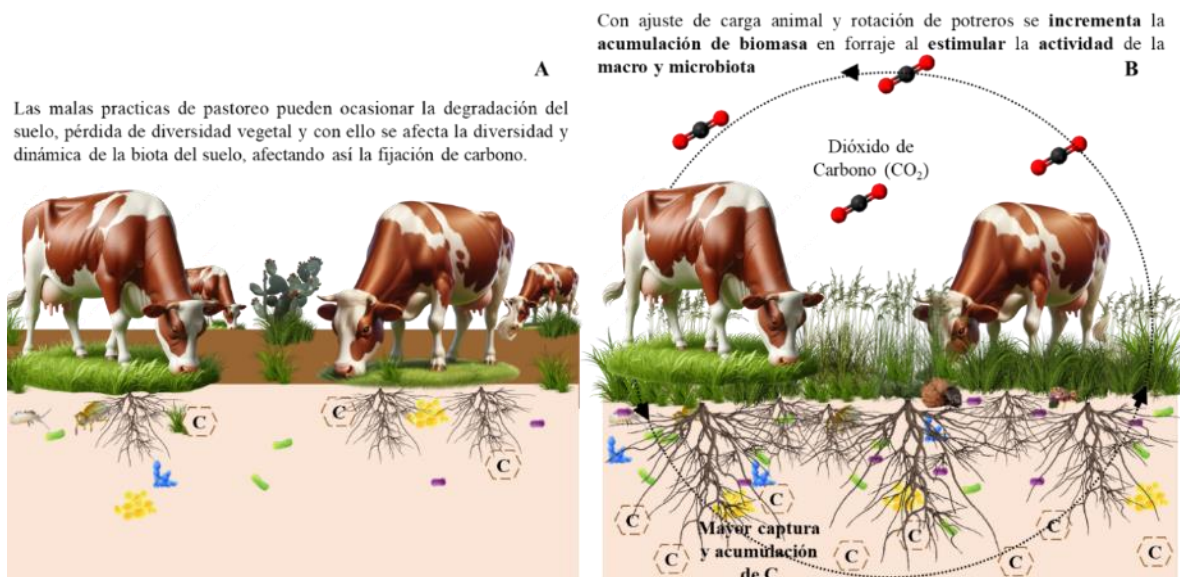


Figura 3. Efecto de las prácticas en pastoreo sobre el suelo. A) La falta de acciones enfocadas a la gestión del pastoreo incrementa la erosión del suelo y en consecuencia hay pérdida de vegetación y especies benéficas al suelo; B) Manejo adecuado de cargas animales permite la estabilidad del suelo al estimular la actividad macro y microbiota del suelo.

Efecto del pastoreo de ganado bovino sobre el ciclo de nutrientes en el suelo

El impacto del pastoreo de ganado bovino sobre el ciclo de nutrientes en el suelo puede ser tanto beneficioso como perjudicial, dependiendo de una variedad de factores, incluyendo la intensidad del pastoreo (Sun et al., 2017), tipo de vegetación (Hobbie, 2015), manejo del pastoreo (Teague y Kreuter, 2020) y la micro, meso y macrobiota del suelo (Azcón-Aguilar y Barea, 2015). El pastoreo manejado y administrado correctamente puede mejorar la ciclicidad de nutrientes en el suelo a través de la deposición de excremento y orina, que actúa como una fuente rica en N y otros nutrientes (García et al., 2021). Estos aportes pueden aumentar la fertilidad del suelo y mejorar la productividad primaria, facilitando el crecimiento de las plantas y la regeneración de los pastizales. Aunque se conoce que un manejo adecuado del pastoreo mejora la estructura de la vegetación (Odadi et al., 2017; Öllerer et al., 2019; Augustine et al., 2020; Schmitz y Isselstein, 2020), son poco los estudios que han examinado o cuantificado la magnitud de los cambios inducidos por el pastoreo de ganado sobre el ciclo de nutrientes en el suelo.

Ciclo del nitrógeno y carbono del suelo

La influencia en los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y carbono en el suelo es un tema de creciente interés científico debido a sus implicaciones ambientales. El ciclo de nitrógeno y carbono son procesos esenciales que regulan la fertilidad del suelo, la productividad del ecosistema y la mitigación del cambio climático (Li et al., 2017; Mitchard, 2018; Ma et al., 2020). Estos ciclos están estrechamente vinculados a las actividades de pastoreo, que pueden alterar la dinámica y la disponibilidad de estos elementos en los ecosistemas terrestres. Por ejemplo, Zhou et al. (2017) evaluaron diferentes intensidades de pastoreo (sin pastoreo, pastoreo ligero, pastoreo moderado y pastoreo intenso) y encontraron que el pastoreo de ganado ligero aumento la respiración del suelo en un 4.25 %, la mineralización del N en 34.67 % y la nitrificación del N en suelo en 25.87 %. Además, el pastoreo ligero mejoro el secuestro de carbono y nitrógeno en el suelo un 0.78 % y 3.24 %, respectivamente. Mientras que, el pastoreo intenso disminuyo un 9.92 % el secuestro de carbono en el suelo y un 13.04 % el N en suelo. La intensidad del pastoreo a través del ajuste de carga animal permite obtener una mejor distribución de los desechos (heces y orina) sobre la superficie del suelo, facilitando la incorporación de estos nutrientes en el suelo. Además, al maximizar el ciclo del nitrógeno y carbono a través de una correcta gestión del pastoreo se contribuye a la resiliencia del ecosistema frente a las perturbaciones, como sequías y altas temperaturas. Los suelos que han sido manejados para optimizar los ciclos de nitrógeno y carbono tienden a tener una mejor estructura y contenido de materia orgánica, lo que les permite retener más agua y resistir la erosión. Esto no solo mejora la productividad a largo plazo, sino que también protege los recursos naturales y fomenta un uso más sostenible del ecosistema (Figura 4).

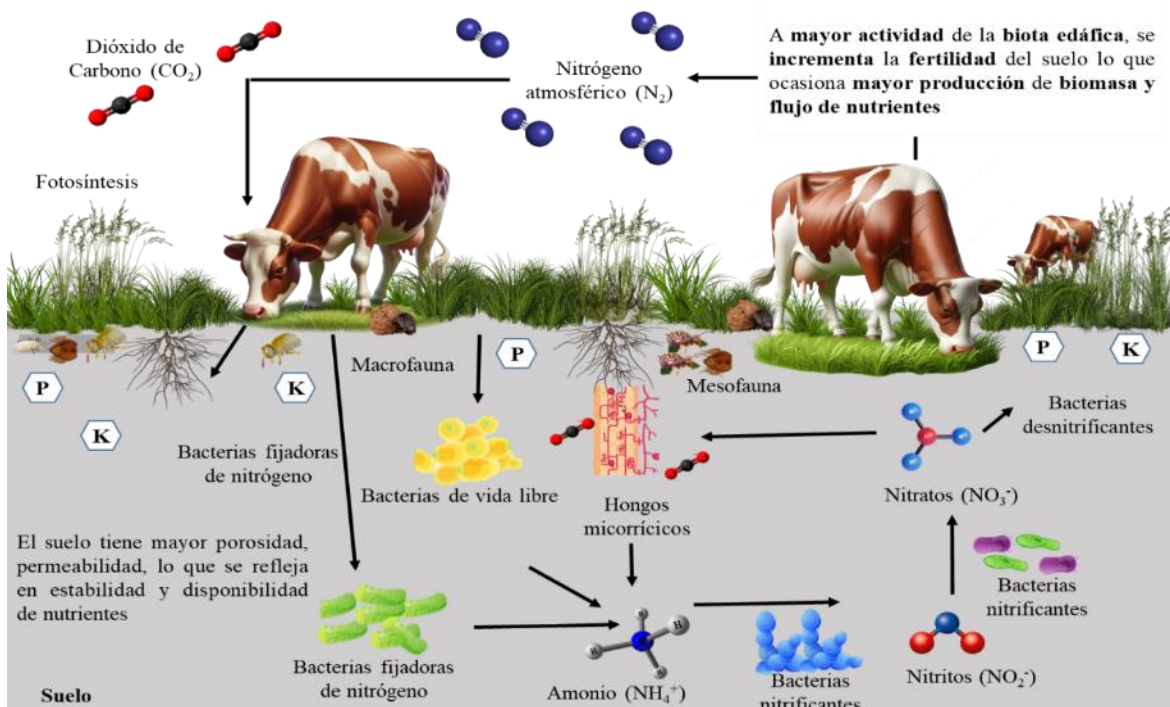


Figura 4. Implementar buenas prácticas de manejo en ganado genera un efecto positivo sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, se estimula la interacción biota, suelo, planta, animal, mejorando el ciclo de los minerales, absorción, fijación y asimilación.

Ciclo del fósforo

El fósforo (P) es nutriente esencial para las especies vegetales, fundamental en el proceso de la fotosíntesis (Mo et al., 2019), transferencia de energía (Carstensen et al., 2018), y el desarrollo del sistema radicular (Lyu et al., 2016). Sin embargo, su disponibilidad en el suelo es limitada debido a su tendencia a formar compuestos insolubles que las plantas no pueden absorber con facilidad. Por lo tanto, el manejo del P en los agostaderos es un desafío crucial para mantener la fertilidad y la productividad del ecosistema a largo plazo (Simpson et al., 2015; Lambers, 2022).

El ciclo del fósforo en el suelo es un proceso complejo que involucra la liberación de fósforo de la MO y su mineralización en formas que las plantas pueden absorber (Yang et al., 2019). De manera natural, gran parte del fósforo en el suelo está presente en formas que no son directamente disponibles para las plantas, como minerales de fosfato insolubles (Zhao et al., 2002). Aquí es donde el manejo adecuado del pastoreo de ganado bovino puede marcar la diferencia, facilitando la movilización y la disponibilidad de fósforo en el suelo.

Una de las maneras en que el pastoreo administrado correctamente puede mejorar el ciclo del fósforo es a través de la distribución uniforme del ganado (Vertès et al., 2019; Carpinelli et

al., 2020). Gray et al. (2022) mencionaron que con una intensidad de pastoreo adecuada junto con un sistema de pastoreo rotativo aumentó el P de 0.323 a 1,222 kg ha⁻¹, probablemente liberado de la deposición de estiércol en el suelo. Los excrementos de bovinos son ricos en P, cuando el ganado es rotado de manera efectiva se asegura una distribución uniforme de los excrementos, lo que ayuda a evitar la acumulación excesiva de P en áreas específicas (sombreaderos o puntos de agua) y promover una mejor incorporación en el suelo (Dubeux y Sollenberger, 2020). Por su parte, Dubeux y Sollenberger, (2020) recomiendan el movimiento (rotación) de sombreaderos, bebederos y comederos durante cada evento de pastoreo para mejorar la distribución espacial del estiércol. De esta manera, se mejora el transporte de P hacia las raíces de las plantas.

Ciclo del potasio

El potasio (K), es un nutriente crucial que regula procesos vitales de la vegetación, como la apertura y cierre de estomas, la síntesis de proteínas (Mostofa et al., 2022) y la osmorregulación, entre otros (Sardans y Peñuelas, 2021). El ciclo del potasio en el suelo comienza con la liberación de este nutriente desde los minerales del suelo a través de procesos de meteorización (Rawat et al., 2016). Una vez en el suelo, el potasio se encuentra en tres formas principales: potasio intercambiable, el cual está disponible para las plantas; potasio no intercambiable, retenido en las capas minerales del suelo; y como potasio en la solución del suelo, que es la forma más fácilmente absorbida por las plantas (Mouhamad et al., 2016). Las prácticas de pastoreo de ganado bovino pueden aumentar la absorción de K en la vegetación al incrementar el crecimiento de las raíces en las plantas (Garcia et al., 2008; Almeida et al., 2021). Posteriormente, los animales consumen las especies forrajeras y el K presente en el forraje se devuelve a la superficie del suelo a través de la deposición de excremento y orina (Dubeux y Sollenberger, 2020; Almeida et al., 2021). Assman et al. (2017) evaluaron diferentes intensidades (intensivo, moderado y liviano) de pastoreo a través de la práctica de ajuste de carga animal para medir la liberación de K en suelo durante un periodo de 120 días. Estos autores encontraron que con una intensidad de pastoreo liviana a moderada se podía aumentar de 82.5 hasta 89.4 kg de K ha⁻¹ a través del depósito de excretas y orina en el suelo, así como en el residuo de las especies vegetales consumidas (hojarasca). La hojarasca al descomponerse puede actuar como una fuente de potasio, extrayendo este nutriente del suelo y redistribuyéndolo a través de la materia orgánica. La materia orgánica,

al descomponerse devuelve el K al suelo, cerrando así el ciclo de nutrientes del fosforo de manera efectiva (Mengel, 2016).

Conclusiones

Realizar prácticas ganaderas adecuadas impactan directamente sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, al generar mayor producción de materia orgánica como residuo del sistema radical de los forrajes, incrementa la biota del suelo, sus acciones de descomposición brindan estructura y estabilidad al suelo, indispensable en la producción ganadera extensiva, cerrando así el ciclo de producción y aprovechamiento de los recursos naturales, mitigando con ello el impacto del cambio climático.

Referencias bibliográficas

- Almeida, T. F., Carvalho, J. K., Reid, E., Martins, A. P., Bissani, C. A., Bortoluzzi, E. C., & Tiecher, T. (2021). Forms and balance of soil potassium from a long-term integrated crop-livestock system in a subtropical Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 207, 104864.
- Apfelbaum, S. I., Thompson, R., Wang, F., Mosier, S., Teague, R., & Byck, P. (2022). Vegetation, water infiltration, and soil carbon response to Adaptive Multi-Paddock and Conventional grazing in Southeastern USA ranches. *Journal of Environmental*, 308, 114576. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114576>
- Assman, J. M., Martins, A. P., Anghinoni, I., de Oliveira-Denardin, L. G., de Holanda-Nichel, G., de Andrade-Costa, S. E. V., & Franzluebbers, A. J. (2017). Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities insubtropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108(1), 21–33. <https://doi.org/10.1007/S10705-016-9818-6>
- Augustine, D. J., Derner, J. D., Fernández-Giménez, M. E., Porensky, L. M., Wilmer, H., & Briske, D. D. (2020). Adaptive, multipaddock rotational grazing management: a ranch-scale assessment of effects on vegetation and livestock performance in semiarid rangeland. *Rangeland Ecology & Management*, 73(6), 796–810. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.07.005>
- Azcón-Aguilar, C., & Barea, J. M. (2015). Nutrient cycling in the mycorrhizosphere. *Nutrient Cycling in the Mycorrhizosphere*, 15(2), 372–396. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000035>
- Beltrán-Burboa, C. E., Pollorena-López, G., & Graciano-Obeso, A. (2023). Efecto del vuelo de un dron sobre la polinización de cultivo de fresa en casa sombra como alternativa a

- la ausencia de polinizadores naturales. *Revista Interdisciplinaria De Ingeniería Sustentable Y Desarrollo Social*, 9(1), 380–389. <https://doi.org/10.63728/riisds.v9i1.124>
- Bengough, A. G., Loades, K., & McKenzie, B. M. (2016). Root hairs aid soil penetration by anchoring the root surface to pore walls. *Journal of Experimental Botany*, 67(4), 1071–1078. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv560>
- Bieluczyk, W., De Cássia, P. M., Pereira, M. G., De Moraes, M. T., Soltangheisi, A., De Campos, A. C., & Cherubin, M. R. (2020). Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma*, 371, 114368. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>
- Byrnes, R. C., Eastburn, D. J., Tate, K. W., & Roche, L. M. (2018). A global meta-analysis of grazing impacts on soil health indicators. *Journal of Environmental Quality*, 47(4), 758–765. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.08.0313>
- Carpinelli, S., da Fonseca, A. F., Weirich-Neto, P. H., Dias, S. H. B., & Pontes, L. D. S. (2020). Spatial and temporal distribution of cattle dung and nutrient cycling in integrated crop–livestock systems. *Agronomy*, 10(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050672>
- Carstensen, A., Herdean, A., Schmidt, S. B., Sharma, A., Spetea, C., Pribil, M., & Husted, S. (2018). The impacts of phosphorus deficiency on the photosynthetic electron transport chain. *Plant Physiology*, 177(1), 271–284. <https://doi.org/10.1104/pp.17.01624>
- Cecagno, D., Gomes, M. V., De Andrade, S. E., Martins, A. P., De Oliveira, D. L., Bayer, C., & Faccio, C. P. (2018). Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Revista Brasileira de Ciência Agrárias*, 13(3), 1–7. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i3a5553>
- Chen, M., & Shi, J. (2018). Effect of rotational grazing on plant and animal production. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 15(2), 393–406. <https://doi.org/10.3934/MBE.2018017>
- Conant, R. T., Cerri, C. E., Osbome, B. B., & Paustian, K. (2017). Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Application*, 27(2), 662–668. <https://doi.org/10.1002/eap.1473>
- Cotler, H., Martínez, M., & Etchevers, J. D. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y políticas públicas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 125–138.
- Dlamini, P., Chivenge, P., & Chaplot, V. (2016). Overgrazing decreases soil organic carbon stocks the most under dry climates and low soil pH: A meta-analysis shows. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 258–269. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.026>
- Döbert, T. F., Bork, E. W., Apfelbaum, S., Carlyle, C. N., Chang, S. X., Khatri-Chhetri, U., & Boyce, M. S. (2021). Adaptive multi-paddock grazing improves water infiltration in

- Canadian grassland soils. *Geoderma*, 401, 115314. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115314>
- Dong, L., Zheng, Y., Martinsen, V., Liang, C., & Mulder, J. (2022). Effect of Grazing Exclusion and Rotational Grazing on Soil Aggregate Stability in Typical Grasslands in Inner Mongolia, China. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 844151. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2022.844151/FULL>
- Dubeux, J. C., & Sollenberger, L. E. (2020). Nutrient cycling in grazed pastures. *Management Strategies for Sustainable Cattle Production in Southern Pastures*, 59–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814474-9.00004-9>
- El Mujtar, V., Muñoz, N., Mc Cormick, B.P., Pulleman, M. and Tittonell, P. 2019. Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand?. *Global Food Security* 20: 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.007>.
- Erb, K. H., Fetzel, T., Kastner, T., Kroisleitner, C., Lauk, C., Mayer, A., & Niedertscheider, M. (2016). Livestock grazing, the neglected land use. In *Social ecology: Society-nature relations across time and space* (1ra eds), 295-313. Cham: Springer International Publishing.
- Follett, R. F., & Reed, D. A. (2010). Soil carbon sequestration in grazing lands: societal benefits and policy implications. *Rangeland ecology & management*, 63(1), 4-15. <https://doi.org/10.2111/08-225.1>
- Galván, C. H. A., Guardado, R. H. B., Álvarez, F. A., & Puente, E. O. R. (2018). Uso sustentable de agostaderos y el sistema vaca-cría en el Noroeste de México. *Agronomía Mesoamericana*, 29(2), 433–447. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i2.29185>
- García, L., Dubeux, C. B., Sollenberger, L. E., Vendramini, M. B., Dilorenzo, N., Santos, R. S., Jaramillo, M., & Ruiz-Moreno, M. (2021). Nutrient excretion from cattle grazing nitrogen-fertilized grass or grass–legume pastures. *Agronomy Journal*, 113(4), 3110–3123. <https://doi.org/10.1002/agj2.20675>
- García, R. A., Crusciol, C. A. C., Calonego, J. C., & Rosolem, C. A. (2008). Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. *European Journal of Agronomy*, 28(4), 579–585. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.002>
- Ge, T., Liu, C., Yuan, H., Zhao, Z., Wu, X., Zhu, Z., Brookes, P., & Wu, J. (2015). Tracking the photosynthesized carbon input into soil organic carbon pools in a rice soil fertilized with nitrogen. *Plant and Soil*, 392(1–2), 17–25. <https://doi.org/10.1007/S11104-014-2265-8>
- Ge, T., Yuan, H., Zhu, H., Wu, X., Nie, S., Liu, C., & Brookes, P. (2012). Biological carbon assimilation and dynamics in a flooded rice–soil system. *Soil Biology and Biochemistry*, 48, 39–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.009>

- Graciano-Obeso, A., Báez-Higuera, J. A., & López-Atondo, J. U. (2023). Conocimiento de la Agenda 2030 y Objetivos de Desarrollo Sostenible en estudiantes de educación superior. *Revista Interdisciplinaria De Ingeniería Sustentable Y Desarrollo Social*, 9(1), 326–335. <https://doi.org/10.63728/riisds.v9i1.120>
- Gray, C. W., Ghimire, C. P., McDowell, R. W., & Muirhead, R. W. (2022). The impact of cattle grazing and treading on soil properties and the transport of phosphorus, sediment and *E. coli* in surface runoff from grazed pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 65(6), 445–462. <https://doi.org/10.1080/00288233.2021.1910319>
- Hobbie, S. E. (2015). Plant species effects on nutrient cycling: revisiting litter feedbacks. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(6), 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.03.015>
- Hou, E., Chen, C., Luo, Y., Zhou, G., Kuang, Y., Zhang, Y., Heenan, M., Lu, X., & Wen, D. (2018). Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24(8), 3344–3356. <https://doi.org/10.1111/gcb.14093>
- Jeffery, S., Harris, J. A., Rickson, R. J., & Ritz, K. (2009). The spectral quality of light influences the temporal development of the microbial phenotype at the arable soil surface. *Soil Biology And*, 41(3), 553–560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.12.014>
- Kazemi, S. M., Karimzadeh, H., Tarkesh, E. M., & Bashari, H. (2018). Effects of long-term enclosure and rest-rotation grazing system on some soil physicochemical properties in semi-arid rangelands (Case study: semi-steppe rangelands. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25(3), 536–546. <https://doi.org/https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.117805>
- Khasi, Z., Askari, M. S., Amanifar, S., & Moravej, K. (2024). Assessing soil structural quality as an indicator of productivity under semi-arid climate. *Soil and Tillage Research*, 236, 105945. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105945>
- Khatri-Chhetri, U., Banerjee, S., Thompson, K. A., Quideau, S. A., Boyce, M. S., Bork, E. W., & Carlyle, C. N. (2024). Cattle grazing management affects soil microbial diversity and community network complexity in the Northern Great Plains. *Science of the Total Environment*, 912, 169353. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169353>
- Khatri-Chhetri, U., Thompson, K. A., Quideau, S. A., Boyce, M. S., Chang, S. X., Kaliaskar, D., & Carlyle, C. N. (2022). Adaptive multi-paddock grazing increases soil nutrient availability and bacteria to fungi ratio in grassland soils. *Applied Soil Ecology*, 179, 104590. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104590>
- Koppe, E., Rupollo, C. Z., de Queiroz, R., Puschmann, D. U., Peth, S., & Reinert, D. (2021).

- Physical recovery of an oxisol subjected to four intensities of dairy cattle grazing. *Soil and Tillage Research*, 206, 104813. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104813>
- Lai, L., & Kumar, S. (2020). A global meta-analysis of livestock grazing impacts on soil properties. *PloS One*, 15(8), e0236638. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0236638>
- Lambers, H. (2022). Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 17–42. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ARPLANT-102720-125738>
- Lawrence, R., Whalley, R. D. B., Reid, N., & Rader, R. (2019). Short-duration rotational grazing leads to improvements in landscape functionality and increased perennial herbaceous plant cover. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 281, 134–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.031>
- Li, Y., Liu, Y., Pan, H., Hernández, M., Guan, X., Wang, W., Zhang, Q., Luo, Y., Di, H., & Xu, J. (2020). Impact of grazing on shaping abundance and composition of active methanotrophs and methane oxidation activity in a grassland soil. *Biology and Fertility of Soils*, 56(6), 799–810. <https://doi.org/10.1007/S00374-020-01461-0>
- Li, Z., Liu, C., Dong, Y., Chang, X., Nie, X., Liu, L., & Zeng, G. (2017). Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly–gully region of China. *Soil and Tillage Research*, 166, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.10.004>
- Liu, Y., Cui, Z., Huang, Z., López-Vicente, M., & Wu, G. L. (2019). Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. *Catena*, 182, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104147>
- Loizeau, S., Rossier, Y., Gaudet, J. P., Refloch, A., Besnard, K., Angulo-Jaramillo, R., & Lassabatere, L. (2017). Water infiltration in an aquifer recharge basin affected by temperature and air entrapment. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(3), 222–233. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0010>
- Lyu, Y., Tang, H., Li, H., Zhang, F., Rengel, Z., Whalley, W. R., & Shen, J. (2016). Major crop species show differential balance between root morphological and physiological responses to variable phosphorus supply. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1–15. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.01939/FULL>
- Ma, Q., Wen, Y., Wang, D., Sun, X., Hill, P. W., Macdonald, A., & Jones, D. L. (2020). Farmyard manure applications stimulate soil carbon and nitrogen cycling by boosting microbial biomass rather than changing its community composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 144, 107760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107760>

- Marin-Díaz, B., Govers, L. L., van Der Wal, D., Olf, H., & Bouma, T. J. (2021). How grazing management can maximize erosion resistance of salt marshes. *Journal of Applied Ecology*, 58(7), 1533–1544. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13888>
- Márquez-Godoy, J. N., & González-Escobedo, R. (2022). Tecnologías ómicas para la exploración de la biocostra del suelo. *Terra Latinoamericana*, 40, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1062>
- Mengel, K. (2016). *Potassium* (C. Press (ed.); 1st ed.). <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781420014877-7/potassium-konrad-mengel>
- Milazzo, F., Francksen, R. M., Abdalla, M., Ravetto Enri, S., Zavattaro, L., Pittarello, M., & Vanwallegem, T. (2023). An overview of permanent grassland grazing management practices and the impacts on principal soil quality indicators. *Agronomy*, 13(5), 1366. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051366>
- Mitchard, E. T. (2018). The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature*, 559(7715), 527–534. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0300-2>
- Mo, Q., Li, Z. A., Sayer, E. J., Lambers, H., Li, Y., Zou, B. I., & Wang, F. (2019). Foliar phosphorus fractions reveal how tropical plants maintain photosynthetic rates despite low soil phosphorus availability. *Functional Ecology*, 33(3), 503–513. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13252>
- Mostofa, M. G., Rahman, M. M., Ghosh, T. K., Kabir, A. H., Abdelrahman, M., Khan, M. A. R., & Tran, L. S. P. (2022). Potassium in plant physiological adaptation to abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 186, 279–289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.07.011>
- Mouhamad, R., Alsaede, A., & Iqbal, M. (2016). Behavior of potassium in soil: a mini review. *Chemistry International*, 2(1), 58–69. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4830.7041>
- Munkholm, L. J., Heck, R. J., Deen, B., & Zidar, T. (2016). Relationship between soil aggregate strength, shape and porosity for soils under different long-term management. *Geoderma*, 268, 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.005>
- Odadi, W. O., Fargione, J., & Rubenstein, D. I. (2017). Vegetation, wildlife, and livestock responses to planned grazing management in an African pastoral landscape. *Degradation & Development*, 28(7), 2030–2038. <https://doi.org/10.1002/ldr.2725>
- Öllerer, K., Varga, A., Kirby, K., Demeter, L., Biró, M., Bölöni, J., & Molnár, Z. (2019). Beyond the obvious impact of domestic livestock grazing on temperate forest vegetation—A global review. *Biological Conservation*, 237, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.07.007>

- Paustian, K., Larson, E., Kent, J., Marx, E., & Swan, A. (2019). Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Frontiers in Climate*, 1, 1–11. <https://doi.org/10.3389/FCLIM.2019.00008/FULL>
- Paz-Kagan, T., Ohana-Levi, N., Herrmann, I., Zaady, E., Henkin, Z., & Karnieli, A. (2016). Grazing intensity effects on soil quality: A spatial analysis of a Mediterranean grassland. *Catena*, 146, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.020>
- Petri, M., Batello, C., Villani, R., & Nachtergaele, F. (2010). Carbon status and carbon sequestration potential in the world's grasslands. *Integrated Crop Management*, 11, 19–31.
- Poeplau, C. (2021). Grassland soil organic carbon stocks along management intensity and warming gradients. *Grass and Forage Science*, 76(2), 186–195. <https://doi.org/10.1111/gfs.12537>
- Rawat, J., Sanwal, P., & Saxena, J. (2016). Potassium and its role in sustainable agriculture ((eds)). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_17
- Saccá, M. L., Barra-Caracciolo, A., Di Lenola, M., & Grenni, P. (2017). Ecosystem services provided by soil microorganisms (Springer (ed.); 1 eds). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63336-7_2
- Sardans, J., & Peñuelas, J. (2015). Potassium: a neglected nutrient in global change. *Global Ecology and Biogeography*, 24(3), 261–275. <https://doi.org/10.1111/geb.12259>
- Schmalz, H. J., Taylor, R. V., Johnson, T. N., Kennedy, P. L., DeBano, S. J., Newingham, B. A., & McDaniel, P. A. (2013). Soil morphologic properties and cattle stocking rate affect dynamic soil properties. *Rangeland Ecology & Management*, 66(4), 445–453. <https://doi.org/10.2111/REM-D-12-00040.1>
- Schmitz, A., & Isselstein, J. (2020). Effect of grazing system on grassland plant species richness and vegetation characteristics: Comparing horse and cattle grazing. *Sustainability*, 12(8), 3300. <https://doi.org/10.3390/su12083300>
- Simpson, R. J., Stefanski, A., Marshall, D. J., Moore, A. D., & Richardson, A. E. (2015). Management of soil phosphorus fertility determines the phosphorus budget of a temperate grazing system and is the key to improving phosphorus efficiency. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 212, 263–277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.026>
- Sun, G., Zhu-Barker, X., Chen, D., Liu, L., Zhang, N., Shi, C., He, L., & Lei, Y. (2017). Responses of root exudation and nutrient cycling to grazing intensities and recovery practices in an alpine meadow: An implication for pasture management. *Plant and Soil*, 416(1–2), 515–525. <https://doi.org/10.1007/S11104-017-3236-7>
- Teague, R., & Kreuter, U. (2020). Managing Grazing to Restore Soil Health, Ecosystem

- Function, and Ecosystem Services. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 534187. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2020.534187/FULL>
- Teague, W. R., Dowhower, S. L., Baker, S. A., Ansley, R. J., Kreuter, U. P., Conover, D. M., & Waggoner, J. A. (2010). Soil and herbaceous plant responses to summer patch burns under continuous and rotational grazing. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 137(1–2), 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.010>
- Teague, W. R., Dowhower, S. L., Baker, S. A., Haile, N., DeLaune, P. B., & Conover, D. M. (2011). Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(3–4), 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.009>
- Vertès, F., Delaby, L., Klumpp, K., & Bloor, J. (2019). C–N–P uncoupling in grazed grasslands and environmental implications of management intensification. *Agroecosystem Diversity*, 15–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00002-9>
- Viglizzo, E. F., Ricard, M. F., Taboada, M. A., & Vázquez-Amábile, G. (2019). Reassessing the role of grazing lands in carbon-balance estimations: Meta-analysis and review. *Science of the Total Environment*, 661, 531–542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.130>
- Villa-Herrera, A., Paz-Pellat, F., Pérez-Hernández, M. J., Rojas-Montes, C., Rodríguez-Arvizu, M., Ortiz-Acosta, S., Casiano-Domínguez, M., & Díaz-Solís, H. (2014). Estimación de la capacidad de carga animal en agostaderos usando un índice de vegetación de pendientes normalizadas. *Agrociencia*, 48(6), 599–614.
- Wang, Z., Jiang, S., Struik, P. C., Wang, H., Jin, K., Wu, R., & Ta, N. (2023). Plant and soil responses to grazing intensity drive changes in the soil microbiome in a desert steppe. *Plant and Soil*, 491(1–2), 219–237. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05409-1>
- Xia, Q., Rufty, T., & Shi, W. (2020). Soil microbial diversity and composition: Links to soil texture and associated properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 149, 107953. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107953>
- Xu, S., Jagadamma, S., & Rowntree, J. (2018). Response of grazing land soil health to management strategies: a summary review. *Sustainability*, 10(12), 4769. <https://doi.org/10.3390/su10124769>
- Yadav, A. N., Kour, D., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A., Dikilitas, M., & Saxena, A. K. (2021). Biodiversity, and biotechnological contribution of beneficial soil microbiomes for nutrient cycling, plant growth improvement and nutrient uptake. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 33, 102009. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102009>
- Yang, X., Chen, X., & Yang, X. (2019). Effect of organic matter on phosphorus adsorption

- and desorption in a black soil from Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 187, 85–91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.016>
- Zhan, T., Zhang, Z., Sun, J., Liu, M., Zhang, X., Peng, F., & Fu, S. (2020). Meta-analysis demonstrating that moderate grazing can improve the soil quality across China's grassland ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 147, 103438. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103438>
- Zhang, M., Li, X., Wang, H., & Huang, Q. (2018). Comprehensive analysis of grazing intensity impacts soil organic carbon: A case study in typical steppe of Inner Mongolia, China. *Applied Soil Ecology*, 129, 1–2. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.03.008>
- Zhang, X., Zhang, W., Sai, X., Chun, F., Li, X., & Wang, H. (2022). Grazing altered soil aggregates, nutrients and enzyme activities in a *Stipa kirschnii* steppe of Inner Mongolia. *Soil and Tillage Research*, 219, 105327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105327>
- Zhao, F., Ren, C., Shelton, S., Wang, Z., Pang, G., Chen, J., & Wang, J. (2017). Grazing intensity influence soil microbial communities and their implications for soil respiration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 249, 50–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.007>
- Zhao, X., Lin, Q., & Li, B. (2002). The solubilization of four insoluble phosphates by some microorganisms. *Acta Microbiologica Sinica*, 42(2), 236–241. <https://europepmc.org/article/med/12557403>
- Zhou, G., Zhou, X., He, Y., Shao, J., Hu, Z., Liu, R., & Hosseinibai, S. (2017). Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 23(3), 1167–1179. <https://doi.org/10.1111/gcb.13431>