

**CAPACIDAD DE LA GANADERÍA REGENERATIVA PARA REVERTIR LOS
PROBLEMAS OCASIONADOS POR LA GANADERÍA EXTENSIVA EN UN
ECOSISTEMA DE BOSQUE SECO TROPICAL EN EL MUNICIPIO DE IBAGUÉ –
TOLIMA.**

JUAN SEBASTIAN FLOMIN RIVERA I.A.

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MODALIDAD VIRTUAL
COHORTE TREINTA
IBAGUÉ (TOLIMA, COLOMBIA)
2023**

**CAPACIDAD DE LA GANADERÍA REGENERATIVA PARA REVERTIR LOS
PROBLEMAS OCASIONADOS POR LA GANADERÍA EXTENSIVA EN UN
ECOSISTEMA DE BOSQUE SECO TROPICAL EN EL MUNICIPIO DE IBAGUÉ –
TOLIMA.**

JUAN SEBASTIAN FLOMIN RIVERA I.A.

**Trabajo de tesis para optar al título de Magíster en desarrollo sostenible y medio
ambiente modalidad virtual**

Director

JUAN CARLOS GRANOBLES TORRES I.A. M.Sc.

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MODALIDAD VIRTUAL
COHORTE TREINTA
IBAGUÉ (TOLIMA, COLOMBIA)
2023**

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Johan Zietsman, y Alan Savory, cuya inspiración ha sido fundamentales en cada etapa de esta investigación. Su entusiasmo por la sostenibilidad y la regeneración de nuestros ecosistemas ha sido una fuente constante de motivación.

A mis familiares, amigos, una mención especial a mis padres y esposa, que han creído en mí y me han brindado el aliento necesario para perseverar en este proyecto. Su paciencia y comprensión han sido invaluable.

Finalmente, a todos los profesionales y expertos en desarrollo sostenible y medio ambiente, ganadería regenerativa, cuyos conocimientos y dedicación contribuyen a la preservación y restauración de nuestros valiosos ecosistemas. Este trabajo es un pequeño tributo a su compromiso con un futuro más equilibrado y sostenible.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales para la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, mi sincero agradecimiento al Docente Juan Carlos Granobles Torres I.A. M.Sc., mi tutor de tesis, por su excepcional guía y apoyo a lo largo de todo el proceso de investigación. Su conocimiento profundo y su dedicación constante han sido cruciales para el desarrollo y la culminación de este proyecto. Su capacidad para ofrecer orientaciones precisas y su aliento inquebrantable han sido una fuente de inspiración y motivación constante.

Agradezco también a mis familiares por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional. Su fe en mí y sus palabras de aliento han sido esenciales para superar los retos y seguir adelante con determinación.

A mis compañeros de estudios, por sus valiosas contribuciones y por compartir este camino académico. Las discusiones y el intercambio de ideas con ustedes han enriquecido significativamente mi perspectiva y el contenido de este trabajo.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a todas las personas docentes y a la Universidad de Manizales que, de alguna manera, han colaborado con recursos, conocimientos o apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

Resumen

Flomin Rivera, J.S. Capacidad de la ganadería regenerativa para revertir los problemas ocasionados por la ganadería extensiva en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de Ibagué – Tolima. Trabajo de grado. Magister en desarrollo sostenible y medio ambiente. Manizales, Caldas, Colombia.: Universidad de Manizales. Facultad de Economía, 2024. 63 p.

La presente tesis explora la capacidad de la ganadería regenerativa para revertir los problemas ambientales asociados con la ganadería extensiva en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de Ibagué, Tolima. La investigación se centra en comparar el impacto de ambos sistemas de manejo ganadero sobre la calidad del suelo en el área de estudio. Se realizaron análisis de muestras de suelo tomadas de áreas gestionadas bajo prácticas de ganadería regenerativa y extensiva. Los resultados revelaron que las muestras provenientes de áreas bajo ganadería regenerativa mostraron una mejora significativa en varias propiedades del suelo en comparación con las muestras de ganadería extensiva. Específicamente, se observaron aumentos en los niveles de materia orgánica, capacidad de retención de agua y actividad microbiológica en los suelos gestionados regenerativamente. Estos hallazgos sugieren que la ganadería regenerativa tiene un potencial considerable para mitigar los efectos negativos de la ganadería extensiva, promoviendo una recuperación más rápida de la calidad del suelo y contribuyendo a la restauración de ecosistemas degradados. La investigación destaca la importancia de adoptar prácticas de manejo más sostenibles para preservar la integridad ecológica de los bosques secos tropicales y mejorar la sostenibilidad a largo plazo de la ganadería en la región.

Palabras clave: Ganadería regenerativa, ganadería extensiva, calidad del suelo, bosque seco tropical, restauración de ecosistemas, sostenibilidad agropecuaria, Tolima, microbiología del suelo, manejo sostenible.

Abstract

Flomin Rivera, J.S. The Capacity of Regenerative Livestock Farming to Reverse the Problems Caused by Extensive Livestock Farming in a Tropical Dry Forest Ecosystem in the Municipality of Ibagué – Tolima. Master's Thesis. Master in Sustainable Development and Environment. Manizales, Caldas, Colombia: Universidad de Manizales. Faculty of Economics, 2024. 63 p.

This thesis explores the capacity of regenerative livestock farming to reverse the environmental problems associated with extensive livestock farming in a tropical dry forest ecosystem in the municipality of Ibagué, Tolima. The research focuses on comparing the impact of both livestock management systems on soil quality in the study area. Soil sample analyses were conducted from areas managed under regenerative and extensive livestock farming practices. The results revealed that samples from areas under regenerative livestock management showed significant improvements in several soil properties compared to those from extensive livestock management. Specifically, increases in organic matter levels, water retention capacity, and microbiological activity were observed in soils managed regeneratively. These findings suggest that regenerative livestock farming has considerable potential to mitigate the negative effects of extensive livestock farming, promoting faster recovery of soil quality and contributing to the restoration of degraded ecosystems. The research highlights the importance of adopting more sustainable management practices to preserve the ecological integrity of tropical dry forests and improve the long-term sustainability of livestock farming in the region.

Keywords: Regenerative livestock farming, extensive livestock farming, soil quality, tropical dry forest, ecosystem restoration, agricultural sustainability, Tolima, soil microbiology, sustainable management.

Tabla de contenido

Resumen	5
Índice de figuras.....	9
Índice de ilustraciones	11
1. Introducción.....	12
2. Planteamiento del problema	14
2.1. Formulación del problema	14
2.2. Pregunta de investigación	15
2.3. Hipótesis	15
2.4. Justificación.....	16
3. Marco teórico	19
3.1. Referente Teórico	19
3.2. Ecosistema de Bosque Seco Tropical	19
3.3. Ganadería Extensiva y sus Impactos	20
3.4. Ganadería Regenerativa.....	21
3.5. Potencial de la Ganadería Regenerativa en el Bosque Seco Tropical	21
3.6. Desafíos y Consideraciones	22
3.7. Antecedentes	22
3.7.1. Situación Mundial de la Ganadería y el Cambio Climático	22
3.7.2. Situación de la Ganadería en Colombia.....	23
3.7.3. Plan Nacional de Desarrollo 2024	24
3.7.4. Plan de Desarrollo Departamental del Tolima 2024.....	25
3.7.5. Plan de Desarrollo de Ibagué 2024	25
3.7.6. Estudios Internacionales	26
3.7.7. Estudios en Colombia	26
3.8. Marco Legal.....	27
3.9. Marco Conceptual.....	28
3.9.1. Ganadería Regenerativa.....	28
3.9.2. Ganadería Extensiva.....	28
3.9.3. Bosque Seco Tropical	28
3.9.4. Sistemas Silvopastoriles	29
3.9.5. Pastoreo de Ultra Alta Densidad (PUAD)	29
3.9.6. Pastoreo racional voisin (PRV)	30

4.	Objetivos.....	31
4.1.	Objetivo general.....	31
4.2.	Objetivos específicos.....	31
5.	Metodología.....	32
5.1.	Tipo y alcance de investigación.....	32
5.2.	Localización de zona de estudio.....	32
5.3.	Diseño experimental.....	33
5.3.1	Muestreo.....	34
5.3.2.	Técnicas de recolección.....	34
5.3.3.	Variables.....	34
5.4.	Fases de la investigación.....	35
5.4.1.	Estrategias para el trabajo de campo.....	36
5.4.2.	Muestreo del Suelo para Análisis Físicoquímico.....	36
6.	Resultados y discusión.....	38
6.1.2	Análisis de la información.....	39
6.1.3	Caracterización físicoquímica de suelos.....	40
6.1.4.	Determinación de los cambios de la materia orgánica y la disponibilidad mineral de los suelos en ambos sistemas de producción ganadera en la zona bajo estudio.....	41
6.1.5.	Evaluación del contenido de esporas de hongos formadoras de micorrizas arbusculares, el recuento de bacterias presuntivas fijadoras de nitrógeno, y de unidades formadoras de colonia de rizobios en suelo en ambos agro ecosistemas bajo estudio.....	59
6.1.6.	Discusión.....	63
7.	Conclusiones.....	68
8.	Recomendaciones.....	71
8.1.	Implementación de sistemas de ganadería regenerativa como el PUAD y PRV.....	71
8.2.	Rotación de potreros y manejo holístico.....	72
8.3.	Mejora de la calidad del suelo a través de la regeneración de pastizales.....	72
8.4.	Conservación de la biodiversidad y corredores biológicos.....	73
8.5.	Educación y sensibilización de los ganaderos.....	73
8.6.	Apoyo institucional y políticas públicas.....	74
8.7.	Monitoreo y seguimiento de indicadores de regeneración.....	74
9.	Referencias.....	75

Índice de figuras

Figura 1. Composición física del suelo de los modelos de ganadería extensiva y regenerativa ubicados en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.	40
Figura 2. Análisis del pH del suelo de modelos ganadería extensiva y ganadería regenerativa ubicados en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.	41
Figura 3. Contenido de Carbono Orgánico y Materia Orgánica en los suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa ubicados en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.	43
Figura 4. Contenido de Nitrógeno y Fosforo en los suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa ubicados en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.	46
Figura 5. Contenido de Potasio en los suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa ubicados en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.	48
Figura 6. Concentración de Calcio (CA), Magnesio (MG), Sodio (NA), y Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.	50
Figura 7. Determinación de la conductividad eléctrica en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.	53
Figura 8. Análisis químico de suelos, concentración de Bromo (B), Cobre (CU), Manganeso (MN), Zinc (ZN), Hierro, (FE), y Azufre (S) en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.	55
Figura 9. Análisis biológico de suelos, cuantificación de esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.	59

Figura 10. Análisis biológico de suelos, recuento de bacterias presuntivas fijadoras de nitrógeno y recuento de unidades formadoras de colonia de rizobios en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima..... 61

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Localización de la zona de estudio.....	33
Ilustración 2. Ubicación de la vereda Aparco, donde se encuentran los dos predios bajo análisis.....	39

1. Introducción

La ganadería extensiva tradicionalmente usada en Colombia causa un sin número de problemas, según la FAO es el principal aportante al problema de calentamiento global dentro de las actividades antrópicas, igualmente es uno de los principales causantes de desertificación y erosión de suelos, al igual que el culpable de la deforestación de los bosques del planeta y la nación, no está fuera de contexto afirmar que “la sustancial contribución de la ganadería al cambio climático y a la contaminación del aire, a la degradación de la tierra, aire y agua y a la reducción de la biodiversidad” es crítica, y su solución debe ser eje central de toda la humanidad, lamentablemente en Latinoamérica el problema es mucho más evidente. Este problema se ve maximizado cuando el ecosistema donde se practica este tipo de actividad pecuaria es el bosque seco tropical que históricamente es el ecosistema con más presión ejercida por el hombre tanto de actividades agrícolas como asentamientos humanos además de ser un ecosistema muy frágil con tendencia a la desertificación por cómo está distribuida su precipitación de forma bimodal con una época de verano bastante seco y árido y una de invierno o lluvias acentuada, en este proyecto evaluaremos la capacidad de la ganadería regenerativa para revertir los problemas ocasionados por la ganadería extensiva en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de Ibagué en el departamento del Tolima, específicamente en la vereda aparco del municipio de Ibagué, en el predio El Cairo, Piedras Negras, y Campo Alegre, siendo El Cairo el único predio que implementa la ganadería regenerativa.

Se espera que el predio El Cairo tenga mayor concentración de materia orgánica, y biología en el suelo (vida) y biodiversidad, lo que haría que tenga más minerales disponibles para las plantas, que los otros dos predios, sirviendo esto como una medida de regeneración, y poder contrastar como la ganadería regenerativa puede revertir los procesos de erosión, compactación, y desertificación causados por la ganadería extensiva tradicional.

Esto se hará realizando muestreos de suelos al azar en lotes de los tres predios en zigzag retirando la capa vegetal superficial, realizando tres muestras de suelo conformadas por tres submuestras, para posteriormente llevarlas al laboratorio de suelos y ser sometidas a un análisis de suelos, donde se medirá la cantidad de materia orgánica, la presencia de macro y micro minerales, y la cantidad de microorganismos.

2. Planteamiento del problema

2.1. Formulación del problema

El calentamiento global, dejó de ser una amenaza, o un monstruo imaginario que se utilizaba para crear conciencia en la humanidad y generar responsabilidad empresarial y ambiental, para convertirse ahora en una realidad que tiene en grave peligro el futuro del hombre y la vida en la tierra, las actividades antrópicas en especial la explotación de los recursos naturales no renovables, como lo son los hidrocarburos, aunque los recursos renovables igualmente como la madera pues su tiempo de recuperación se ve avasallado por el tiempo de extracción y la que mayor genera impacto es la agricultura industrial, con sus grandes extensiones de monocultivos, la aplicación de venenos sobre el manto terrestre y vegetal del planeta, la implementación de maquinaria que parece más destinada para emprender una guerra que para la producción de alimentos, los feed lots, y ganadería extensiva, todas ellas sumadas están causando la aceleración del calentamiento global, la erosión y la desertificación.

Esto convierte al bosque seco tropical a uno de los ecosistemas con mayor riesgo de desaparecer, porque es el ecosistema más intervenido por el hombre para desarrollar las actividades de la agricultura industrializada (Gómez & Pérez, 2019). Este ecosistema, que suele presentar periodos bimodales de precipitación, uno de sequía y uno de lluvia, lo convierte en un ecosistema que puede tornarse desértico con gran facilidad (López et al., 2020). Especialmente si se intensifican las actividades agropecuarias sin actividades de conservación. (Martínez, 2021).

Es del conocer popular que la zona rural de Ibagué en su mayoría se dedica a la caficultura de pequeños productores y familias cafeteras desarrollada sobre los 1100 msnm hasta los 3000 msnm generalmente, pero en el abanico de Ibagué en su zona rural por debajo de los 900 msnm, se encuentran grandes extensiones del monocultivo de arroz, y ganadería extensiva desarrollada en el ecosistema de bosque seco tropical lo que ha generado grandes problemas sobre el medio ambiente de la región, ocasionando la aceleración del calentamiento global, desertificación y erosión la zona de bosque seco tropical de Ibagué – Tolima.

2.2. Pregunta de investigación

¿Cuál es la capacidad de la ganadería regenerativa para revertir los problemas ocasionados por la ganadería extensiva en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de Ibagué – Tolima?

2.3. Hipótesis

Se espera que la ganadería regenerativa tenga el potencial, a través de la implementación de prácticas sostenibles como la rotación de pastoreo, las especies nativas y la gestión adecuada de recursos hídricos, debe revertir los impactos ocasionados por la ganadería extensiva en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de Ibagué – Tolima, del mismo modo se espera que estas prácticas mejoren la calidad del suelo promuevan la biodiversidad y restauren la salud del ecosistema afectado (Bautista et al., 2022). En este marco se justifica la realización de esta investigación para evaluar de manera integral el impacto y la viabilidad de la ganadería regenerativa como herramienta de restauración del ecosistema. (Pinzón- García P., 2018).

2.4. Justificación

La ganadería extensiva ha sido históricamente una actividad económica predominante en el municipio de Ibagué, Tolima, ubicado en un ecosistema de bosque seco tropical (BST), un bioma que se caracteriza por su alta biodiversidad y su vulnerabilidad frente a las prácticas insostenibles (Pizano & García, 2014). Sin embargo, esta forma de producción ha causado serios problemas ambientales, entre los que destacan la degradación de suelos, la deforestación y la pérdida de biodiversidad (Calle et al., 2013). A medida que estos impactos se hacen más visibles, surge la necesidad urgente de buscar alternativas sostenibles que permitan revertir estos efectos adversos y, al mismo tiempo, garantizar la viabilidad económica de los pequeños y medianos ganaderos de la región.

La ganadería regenerativa se presenta como una solución viable a estos problemas, ya que busca no solo mitigar el impacto de la actividad ganadera sobre el medio ambiente, sino regenerar los ecosistemas afectados mediante prácticas que imitan los procesos naturales (Teague et al., 2016). Estas prácticas incluyen la rotación de pastizales, el uso de sistemas silvopastoriles y la mejora de la salud del suelo, promoviendo un ciclo virtuoso de recuperación ecológica y productividad (Savory & Butterfield, 2016). El BST es un ecosistema particularmente sensible, y su restauración a través de enfoques regenerativos podría traer múltiples beneficios, desde la mejora en la calidad del suelo y la retención de agua hasta la creación de hábitats para la fauna local, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad (Murgueitio et al., 2011).

Este trabajo de tesis es de relevancia crítica debido a que la degradación del BST en Tolima no solo compromete la capacidad de las tierras para sostener actividades ganaderas a largo plazo, sino que también afecta la estabilidad ecológica y económica de la región. Según estudios recientes, el cambio climático y las prácticas agrícolas insostenibles han exacerbado la fragilidad de estos ecosistemas, aumentando los periodos de sequía y disminuyendo la productividad agrícola (FAO, 2021). La adopción de prácticas regenerativas ofrece una oportunidad única para revertir estos efectos, mejorando la resiliencia de los sistemas productivos locales frente a los desafíos climáticos y ambientales.

Además, es fundamental destacar el componente social y económico de la ganadería regenerativa. Al promover una mayor productividad a largo plazo, esta forma de producción contribuye a la sostenibilidad económica de las comunidades rurales, proporcionando una fuente de ingresos más estable y resiliente en comparación con la ganadería extensiva tradicional (Giraldo et al., 2011). La implementación de estas prácticas requiere, sin embargo, un cambio de paradigma en los productores locales, que deben ser apoyados a través de políticas públicas y programas de capacitación que faciliten la transición hacia sistemas más sostenibles (Broom et al., 2013).

En resumen, esta investigación es justificada no solo por su potencial de contribuir al conocimiento académico sobre la restauración de ecosistemas degradados a través de la ganadería regenerativa, sino también por su pertinencia social y económica para el municipio de Ibagué. Este estudio proporcionará un marco práctico y teórico para la adopción de prácticas

sostenibles que, a largo plazo, beneficiarán tanto al medio ambiente como a las comunidades locales.

3. Marco teórico

3.1. Referente Teórico

El enfoque teórico de esta investigación se fundamenta en la teoría de la ecología de sistemas, la cual plantea que los sistemas agropecuarios deben ser gestionados como ecosistemas integrados, donde la salud del suelo, la biodiversidad y los ciclos de nutrientes son componentes clave para la sostenibilidad a largo plazo (Altieri & Nicholls, 2004). Esta perspectiva contrasta con el enfoque de la ganadería extensiva, que a menudo ignora las interconexiones ecológicas, llevando a la degradación de los recursos naturales. La ganadería regenerativa también se basa en principios de la agroecología, que promueve la diversificación y el uso eficiente de los recursos naturales, minimizando el uso de insumos externos y potenciando los procesos biológicos naturales (Gliessman, 2015).

3.2. Ecosistema de Bosque Seco Tropical

El bosque seco tropical es un ecosistema caracterizado por una temporada seca prolongada y una vegetación adaptada a condiciones de baja humedad (Pennington et al., 2009). Este tipo de bosque es uno de los ecosistemas más amenazados y menos protegidos a nivel global, con tasas de deforestación que superan las de otros tipos de bosques tropicales (Miles et al., 2006). En Colombia, y específicamente en el municipio de Ibagué, el bosque seco tropical ha

sido sometido a una intensa presión por la expansión agrícola y ganadera, lo que ha llevado a su fragmentación y degradación (Pizano & García, 2014).

El bosque seco tropical en el municipio de Ibagué, Tolima, se encuentra en un estado crítico de conservación, caracterizado por una alta tasa de fragmentación y pérdida de cobertura vegetal debido a la expansión de la frontera agrícola y ganadera (Instituto Humboldt, 2018). Según el Instituto Humboldt, solo el 8% del área original de bosque seco permanece en estado natural en Colombia, y en Tolima, los fragmentos que subsisten están altamente amenazados (Instituto Humboldt, 2018). Estos remanentes de bosque desempeñan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad local, al proveer hábitat para especies endémicas y en peligro, aunque la intervención humana sigue siendo una de las principales amenazas para su persistencia (Instituto Humboldt, 2019).

3.3. Ganadería Extensiva y sus Impactos

La ganadería extensiva, que se caracteriza por el uso de grandes extensiones de tierra con baja densidad de ganado, ha sido una de las principales causas de la degradación de los bosques secos tropicales en Ibagué (Rodríguez & Prieto, 2020). Este sistema de producción ha llevado a la deforestación masiva, la compactación del suelo, la erosión y la pérdida de biodiversidad, comprometiendo la capacidad de los ecosistemas para mantener sus funciones ecológicas (Esquivel-Mimenza et al., 2021). Además, la ganadería extensiva suele depender del uso de insumos externos como fertilizantes y pesticidas, lo que incrementa la contaminación y la degradación del suelo (McGahey et al., 2014).

3.4. Ganadería Regenerativa

La ganadería regenerativa surge como una alternativa sostenible frente a los problemas ocasionados por la ganadería extensiva. Este enfoque se basa en principios agroecológicos y tiene como objetivo la restauración y mejora de los recursos naturales a través de prácticas como el pastoreo rotacional, la agroforestería y la integración de cultivos (Teague & Barnes, 2017). Estas prácticas buscan aumentar la fertilidad del suelo, mejorar la retención de agua, promover la biodiversidad y reducir la dependencia de insumos externos, creando un sistema más resiliente y sostenible (Guzmán & Zarco-Tejada, 2019).

El pastoreo rotacional, por ejemplo, permite que las áreas de pasto se recuperen entre períodos de pastoreo, lo que evita la sobreexplotación del suelo y favorece la regeneración de la vegetación nativa (Briske et al., 2008). La agroforestería, por su parte, combina la producción ganadera con el cultivo de árboles, lo que mejora la estructura del suelo, captura carbono y proporciona hábitat para la fauna local (Montagnini & Nair, 2004). Estas prácticas no solo contribuyen a la restauración del ecosistema, sino que también pueden aumentar la productividad y la rentabilidad del sistema ganadero a largo plazo (López-Ridaura et al., 2020).

3.5. Potencial de la Ganadería Regenerativa en el Bosque Seco Tropical

El potencial de la ganadería regenerativa para revertir los impactos de la ganadería extensiva en el bosque seco tropical es significativo. Estudios han demostrado que la implementación de prácticas regenerativas puede restaurar la funcionalidad ecológica del suelo, aumentar la biodiversidad y mejorar la sostenibilidad económica de las explotaciones ganaderas (Teague & Barnes, 2017; Guzmán & Zarco-Tejada, 2019). En el contexto del municipio de

Ibagué, estas prácticas podrían no solo contribuir a la conservación del bosque seco tropical, sino también ofrecer un modelo para la transición hacia sistemas productivos más sostenibles en otras regiones similares.

3.6. Desafíos y Consideraciones

A pesar de los beneficios potenciales, la adopción de la ganadería regenerativa enfrenta varios desafíos, incluyendo la falta de conocimiento y formación en estas prácticas, las barreras económicas y la resistencia al cambio por parte de los productores tradicionales (García-Llorente et al., 2018). Además, es necesario desarrollar políticas públicas que promuevan y apoyen la transición hacia sistemas más sostenibles, incluyendo incentivos económicos, programas de capacitación y la creación de mercados para productos regenerativos (Pretty et al., 2018).

3.7. Antecedentes

3.7.1. Situación Mundial de la Ganadería y el Cambio Climático

A nivel global, la ganadería es una de las principales actividades económicas que contribuyen al cambio climático. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el sector ganadero es responsable de aproximadamente el 14.5 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente en forma de metano y óxido nitroso (FAO, 2013). La producción ganadera extensiva, caracterizada por su baja eficiencia en el uso de los recursos naturales, ha intensificado problemas como la deforestación, la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad (Steinfeld et al., 2006). Estos problemas son particularmente graves en los ecosistemas tropicales, como el bosque seco

tropical, que ya enfrentan presiones ambientales significativas debido a su vulnerabilidad y su limitada capacidad de recuperación.

La necesidad de implementar prácticas de ganadería más sostenibles ha ganado relevancia en foros internacionales como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26), donde se enfatizó la importancia de reducir las emisiones de GEI del sector agropecuario y de restaurar ecosistemas degradados. La ganadería regenerativa se presenta como una alternativa que puede reducir la huella de carbono del sector, regenerar suelos degradados y restaurar la biodiversidad en paisajes afectados por prácticas convencionales (IPCC, 2019).

3.7.2. Situación de la Ganadería en Colombia

En Colombia, la ganadería es una actividad económica de gran importancia, ya que representa el 3.6 % del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y emplea a aproximadamente 3 millones de personas (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021). Sin embargo, el modelo predominante de ganadería extensiva ha sido identificado como una de las principales causas de la deforestación y degradación del suelo en el país. Según datos del IDEAM, entre 2015 y 2020, el país perdió un promedio de 100.000 hectáreas de bosque cada año debido a la expansión de la frontera agrícola y ganadera (IDEAM, 2020).

En respuesta a esta situación, el gobierno colombiano ha desarrollado políticas que buscan transformar la ganadería extensiva hacia modelos más sostenibles. Una de las principales estrategias es el Pacto por la Sostenibilidad incluido en el *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026* del presidente Gustavo Petro, que tiene como objetivo promover prácticas agropecuarias

que contribuyan a la restauración de ecosistemas estratégicos y la reducción de la deforestación (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2022). Este plan incluye metas concretas para la implementación de sistemas silvopastoriles y la adopción de prácticas regenerativas en áreas prioritarias, como los ecosistemas de bosque seco tropical.

3.7.3. Plan Nacional de Desarrollo 2024

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2022-2026, titulado *Colombia, Potencia Mundial de la Vida*, establece una hoja de ruta clara para la transformación del sector agropecuario. El plan propone la restauración de 300.000 hectáreas de tierras degradadas mediante la implementación de prácticas de ganadería sostenible y regenerativa (DNP, 2022). Además, se busca reducir las emisiones del sector agrícola en un 15 % para 2030, alineándose con los compromisos internacionales de Colombia en el marco del Acuerdo de París. Para ello, el plan fomenta la creación de incentivos económicos y financieros que promuevan la adopción de prácticas agropecuarias que regeneren los ecosistemas y mejoren la productividad.

En este contexto, la ganadería regenerativa se presenta como un componente clave para lograr estos objetivos. El PND promueve el uso de sistemas integrados de producción agropecuaria que combinen la producción ganadera con la reforestación y la recuperación de la biodiversidad en zonas como el bosque seco tropical, que han sido gravemente afectadas por la ganadería extensiva (DNP, 2022).

3.7.4. Plan de Desarrollo Departamental del Tolima 2024

El Plan de Desarrollo Departamental del Tolima 2024, alineado con el PND, establece como uno de sus principales objetivos la conservación y restauración de los ecosistemas estratégicos del departamento, incluyendo el bosque seco tropical (Gobernación del Tolima, 2023). Este plan reconoce la necesidad urgente de mitigar los efectos de la deforestación y la degradación del suelo causados por la expansión ganadera. En particular, se enfatiza la importancia de implementar prácticas agropecuarias sostenibles, como los sistemas silvopastoriles y el pastoreo holístico, que permitan restaurar la funcionalidad ecológica de las tierras agrícolas y mejorar la productividad ganadera de forma sostenible.

El plan también destaca la necesidad de generar capacidades técnicas y financieras en los productores ganaderos para que puedan adoptar tecnologías más amigables con el medio ambiente. Se proponen incentivos económicos y la creación de alianzas público-privadas que faciliten la transición hacia modelos de ganadería regenerativa, especialmente en municipios como Ibagué, donde el impacto de la ganadería extensiva ha sido significativo en los ecosistemas de bosque seco tropical (Gobernación del Tolima, 2023).

3.7.5. Plan de Desarrollo de Ibagué 2024

El Plan de Desarrollo Municipal de Ibagué 2024 está centrado en el desarrollo sostenible de la ciudad y sus áreas rurales. Uno de los ejes estratégicos del plan es la restauración ambiental y la protección de los recursos naturales, con un enfoque particular en los ecosistemas de bosque seco tropical que rodean el municipio (Alcaldía de Ibagué, 2023). El plan busca promover la adopción de prácticas de ganadería regenerativa en las zonas rurales del municipio, incentivando

a los productores locales a restaurar los suelos y aumentar la cobertura vegetal a través de la implementación de sistemas silvopastoriles y el manejo holístico del pastoreo.

En línea con el PND y el Plan de Desarrollo Departamental, el plan de Ibagué establece la meta de recuperar al menos 5.000 hectáreas de tierras degradadas mediante la adopción de prácticas agropecuarias sostenibles para el año 2026. Además, el municipio ha propuesto la creación de un fondo de apoyo para pequeños ganaderos que deseen adoptar prácticas regenerativas, facilitando el acceso a asistencia técnica y financiamiento para proyectos de restauración ecológica (Alcaldía de Ibagué, 2023).

3.7.6. Estudios Internacionales

Investigaciones realizadas en diversas partes del mundo han demostrado los beneficios de la ganadería regenerativa en la restauración de ecosistemas degradados. Por ejemplo, Teague et al. (2013) encontraron que el pastoreo rotacional, una práctica clave de la ganadería regenerativa, mejora la estructura del suelo y aumenta la biodiversidad en comparación con la ganadería extensiva. Asimismo, Briske et al. (2008) documentaron cómo la ganadería regenerativa puede contribuir a la recuperación de la vegetación nativa en áreas degradadas, lo que es crucial en ecosistemas como el bosque seco tropical.

3.7.7. Estudios en Colombia

En Colombia, la investigación sobre ganadería regenerativa aún es emergente, pero estudios como el de Guzmán y Zarco-Tejada (2019) han evidenciado que la implementación de sistemas silvopastoriles en áreas ganaderas puede mejorar la salud del suelo y la biodiversidad.

Estos sistemas combinan árboles y arbustos con pastizales, creando un entorno más equilibrado y resiliente. En el contexto del bosque seco tropical, estos enfoques son prometedores para revertir los impactos negativos de la ganadería extensiva (Pizano & García, 2014).

3.8. Marco Legal

El marco legal relacionado con la ganadería y la protección de ecosistemas en Colombia está compuesto por varias leyes y decretos que buscan promover la sostenibilidad ambiental y el uso adecuado de los recursos naturales. La Ley 99 de 1993, que establece el marco general para la protección del medio ambiente en Colombia, es una de las bases legales más importantes, ya que define los principios de la sostenibilidad y la gestión de los recursos naturales, incluyendo la regulación de las prácticas ganaderas.

Además, el Decreto 1500 de 2007 regula la producción y comercialización de carne, estableciendo estándares para las prácticas ganaderas que buscan reducir los impactos ambientales negativos. En cuanto a la protección específica del bosque seco tropical, la Ley 1930 de 2018 es crucial, ya que establece medidas para la preservación de los ecosistemas estratégicos del país, incluyendo la restauración de áreas degradadas.

El municipio de Ibagué también se rige por ordenanzas locales que promueven la gestión sostenible del territorio, alineadas con las directrices del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), que incorpora la protección de los ecosistemas frágiles como el bosque seco tropical.

3.9. Marco Conceptual

3.9.1. Ganadería Regenerativa

Es un enfoque de manejo ganadero que busca regenerar la salud de los suelos, la biodiversidad y la funcionalidad de los ecosistemas a través de prácticas como el pastoreo rotacional y los sistemas agroforestales (Savory, 2013). A diferencia de la ganadería extensiva, que se enfoca en la producción con poco control sobre el impacto ambiental, la ganadería regenerativa integra prácticas que mejoran el ciclo de nutrientes y aumentan la captura de carbono en el suelo.

3.9.2. Ganadería Extensiva

Es un sistema de producción basado en la cría de ganado en grandes áreas con baja densidad animal, lo que frecuentemente resulta en la degradación del suelo, la deforestación y la pérdida de biodiversidad, especialmente en ecosistemas frágiles como el bosque seco tropical (Rodríguez & Prieto, 2020).

3.9.3. Bosque Seco Tropical

Es un tipo de ecosistema que se caracteriza por largos períodos de sequía y una diversidad biológica adaptada a estas condiciones extremas. En Colombia, el bosque seco tropical es uno de los ecosistemas más amenazados debido a la expansión agrícola y ganadera (Pizano & García, 2014).

3.9.4. Sistemas Silvopastoriles

Son sistemas agroforestales que combinan la producción de ganado con árboles y arbustos, mejorando la estructura del suelo, aumentando la biodiversidad y proporcionando servicios ecosistémicos como la captura de carbono (Montagnini & Nair, 2004).

3.9.5. Pastoreo de Ultra Alta Densidad (PUAD)

El PUAD es una técnica que implica concentrar un número elevado de animales en un área pequeña durante un corto período, imitando el comportamiento de las grandes manadas de herbívoros en la naturaleza. Este tipo de pastoreo se fundamenta en el impacto positivo que tiene el pisoteo de los animales sobre el suelo, ya que promueve la descomposición de la materia orgánica y facilita la infiltración de agua. Además, el PUAD ayuda a controlar el sobrepastoreo, pues los animales son trasladados antes de que puedan consumir el rebrote de las plantas (Miklovic et al., 2017).

Desde la perspectiva de la regeneración del suelo, este tipo de manejo permite que las áreas pastoreadas tengan un tiempo de descanso adecuado, lo que favorece la recuperación de las especies vegetales y la acumulación de materia orgánica en el suelo (Brown, 2018). En este sentido, el PUAD no solo optimiza el uso del pasto disponible, sino que también genera un ciclo natural de fertilización a través de los excrementos y el pisoteo controlado, lo que contribuye a mejorar la salud del suelo y su capacidad de retener humedad.

3.9.6. Pastoreo racional voisin (PRV)

El Pastoreo Racional Voisin, desarrollado por el ingeniero francés André Voisin en la década de 1950, propone una planificación meticulosa del pastoreo que se basa en los principios de descanso adecuados para las plantas y tiempos de ocupación cortos en los potreros. El PRV establece que los animales deben ser trasladados frecuentemente de un potrero a otro, lo que permite que las plantas tengan un tiempo óptimo de recuperación antes de ser pastore.

Este enfoque es especialmente útil en ecosistemas frágiles como los bosques secos tropicales, donde el manejo inadecuado de los pastos puede llevar a la desertificación. El PRV ayuda a preservar la biodiversidad y a mantener una cobertura vegetal constante, lo que es crucial para evitar la erosión del suelo y la pérdida de nutrientes. Además, este sistema promueve la homogeneidad en el pastoreo, lo que reduce el impacto negativo del sobrepastoreo en áreas específicas y favorece un uso más equitativo de los recursos forrajeros (Guzmán & Ruiz, 2020).

Ambas técnicas, PUAD y PRV, son herramientas fundamentales dentro del modelo de ganadería regenerativa, ya que permiten un manejo sostenible del ganado y los pastizales, contribuyendo a la restauración de los suelos y a la mejora de la productividad a largo plazo. Al integrar estos métodos, los ganaderos pueden no solo mantener la salud de sus tierras, sino también mejorar la capacidad de los ecosistemas para resistir los efectos adversos del cambio climático.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Analizar la capacidad de la ganadería regenerativa para revertir los problemas ocasionados por la ganadería extensiva en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de Ibagué – Tolima.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar los cambios de la materia orgánica y a disponibilidad mineral de los suelos en ambos sistemas de producción ganadera en la zona bajo estudio.
- Evaluar el contenido de esporas de hongos formadoras de micorrizas arbusculares, el recuento de bacterias presuntivas fijadoras de nitrógeno, y de unidades formadoras de colonia de rizobios en suelo en ambos agro ecosistemas bajo estudio.
- Caracterizar física y químicamente los suelos de los dos modelos de ganadería.

5. Metodología

5.1. Tipo y alcance de investigación

La investigación propuesta es de tipo cuantitativa analítica, enmarcada dentro del enfoque empírico-analítico. Este enfoque se caracteriza por la recopilación y análisis de datos cuantitativos con el fin de identificar patrones, relaciones y efectos entre las variables estudiadas. En este caso, se busca analizar el impacto de la ganadería regenerativa comparada con la ganadería extensiva sobre el ecosistema del bosque seco tropical en Ibagué, Tolima. Según Creswell y Creswell (2018), la investigación cuantitativa es adecuada para estudios que requieren la medición precisa de variables y la aplicación de análisis estadísticos para probar hipótesis.

Dentro de este enfoque, el estudio se clasifica como analítico debido a que busca descomponer y examinar los componentes específicos del sistema productivo de la ganadería regenerativa y extensiva para entender cómo estos influyen en variables ambientales críticas como la composición del suelo y la biodiversidad microbiana (Berndtsson et al., 2019).

5.2. Localización de zona de estudio

El estudio se realizará en el departamento del Tolima, en el municipio de Ibagué, en la vereda Aparco, en el predio El Cairo (GR) que implementa el sistema de ganadería regenerativa,

y al otro predio lo llamaremos predio (GE) que usan el sistema de ganadería extensiva tradicional ubicados en la misma vereda.

Ilustración 1. Localización de la zona de estudio

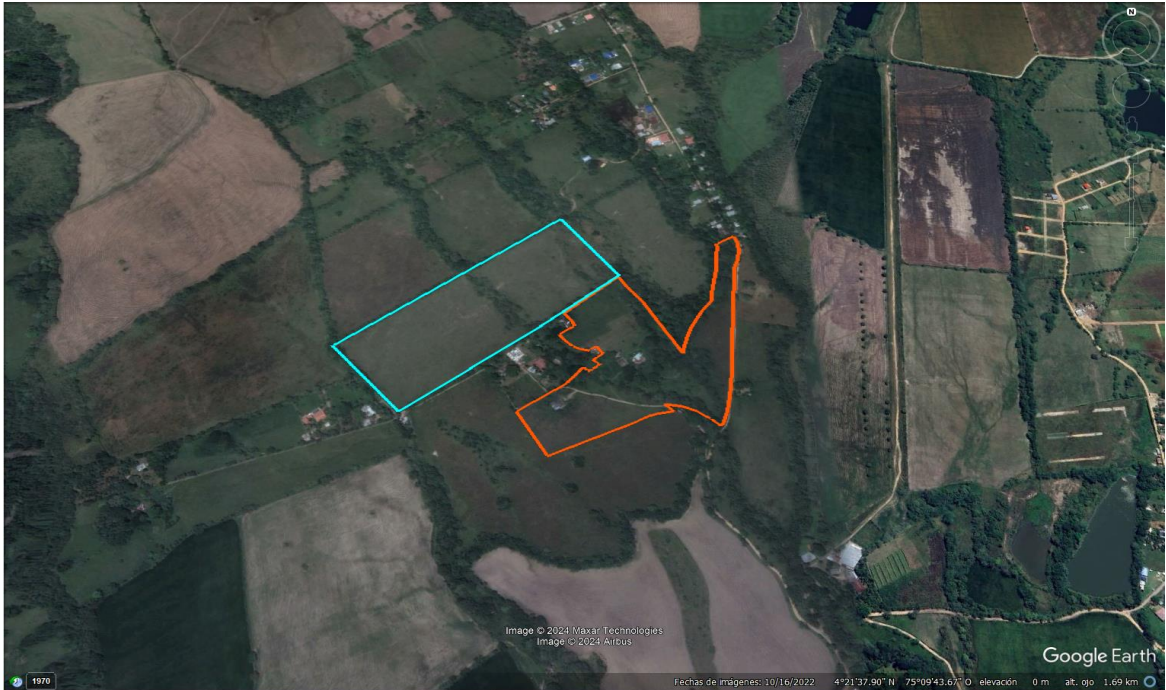


Foto 1. Tomada de Google Earth.

Predio el Cairo GR (Naranja), Coordenadas N 4°21'46.72" W 75°09'41.31" Elevación: 884msnm

Predio GE (Verde) Coordenadas N 4°21'51.61" W 75°09'46.92" Elevación: 887msnm

5.3. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado en esta investigación es completamente al azar con 4 repeticiones por tratamiento. Este tipo de diseño es ampliamente recomendado en estudios agronómicos y ambientales donde es necesario minimizar el sesgo y controlar las variaciones no controladas (Gomez & Gomez, 1984). En este contexto, los tratamientos corresponden a los

diferentes sistemas productivos (ganadería regenerativa y ganadería extensiva), lo que permite comparar directamente los efectos de cada sistema sobre las variables de interés.

Las 4 repeticiones por tratamiento se justifican en la necesidad de asegurar la robustez estadística de los resultados, permitiendo una estimación precisa del efecto de los tratamientos y la reducción de la variabilidad causada por factores no controlados (Montgomery, 2017).

5.3.1 Muestreo

5.3.2. Técnicas de recolección

Se tomaron 2 muestras de suelo por potrero, y se busca que los potreros sean lo más homogéneo posible en cuanto a condiciones ecológicas, como físicas y climáticas para evitar la variabilidad de resultados por injerencia de factores externos

5.3.3. Variables

- Análisis físico, químico, y biológico.
- pH. Por el método potenciometría GA-R-46, versión 06, 2021-10-25.
- Textura. Por el método de Bouyoucos.
- Materia Orgánica. Por el método de cálculo matemático a partir del contenido de carbono orgánico según NTC 5403 Walkey & Black.
- Carbono Orgánico. Por el método de espectrofotometría UV-VIS.
- Capacidad de intercambio catiónico. Por el método sociedad colombiana de ciencia de suelo “SCCS” 1981/ técnica calculo.

- Saturación por bases. Por un caculo de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la determinación de cationes intercambiables que se realiza mediante el método de acetato de amonio a pH 7.
- N, P, K. por el método extracción Bray I; cuantificación: espectrofotometría UV-VIS.
- Determinación de micronutrientes en suelo (Fe, Cu, Mn, Zn). Por el método de extracción solución Olsen modificada. Cuantificación: espectrofotometría de absorción atómica.
- Entre los parámetros disponibles para análisis se encuentran cuantificación de esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares. Por el método de tamizado y centrifugación adaptado de Gendeman y Nicolson 1963.
- Recuento de bacterias presuntivas fijadoras de nitrógeno. Por el método de recuento en placa.
- Recuento de unidades formadoras de colonia. Por el método de recuento en placa de UFC.

5.4. Fases de la investigación

Fase 1 Lectura análisis, y recolección de información.

Fase 2 Recolección de muestras de suelo, análisis fisicoquímicos, de materia orgánica (mo) y microbiológico de las muestras de suelo.

Fase 3 Interpretación, discusión y análisis de los resultados obtenidos.

5.4.1. Estrategias para el trabajo de campo

Se realizaron tres prácticas de campo el día 5 en el mes de agosto del año 2024 dirigida por el ingeniero agrónomo, en compañía de dos contratistas que se encargaron de realizar la calicata y recolectar las muestras de suelo de los diferentes potreros seleccionados de los predios el Cairo (GR), y el predio de ganadería extensiva (GE), dichas muestras se recolectaron en condiciones de temporada y climáticas similares para evitar la variabilidad por factores externos, posteriormente las muestras se empacaron en bolsas las cuales iban marcadas con el nombre de la finca, el número del potrero y el número de la muestra, las coordenadas de la toma de muestra, y el análisis al que se iba a someter cada una de las muestras para su transporte a el laboratorio de Agrosavia y someterla a unos análisis fisicoquímicos, de materia orgánica y (biología), posteriormente se compararon los resultados obtenidos entre los modelos de ganadería, determinando así la diferencia entre la cantidad de microorganismos (biología de ambas explotaciones), el contenido de materia orgánica y por último se comparara el contenido mineral entre los suelos de las tres explotaciones. Utilizando la metodología de Anderson e Ingram (1993) y (ICA)

5.4.2. Muestreo del Suelo para Análisis Fisicoquímico

En los dos potreros destinados a pastoreo extensivo se trazaron trayectos y se recorrieron en zigzag para recolectar una muestra cada 20 m y obtener una muestra compuesta por 4 submuestras.

En los ambientes destinados a GR (ganadería regenerativa) se eligieron aleatoriamente dos potreros en cada ambiente y en cada potrero se obtuvo una muestra compuesta ($n = 4$ submuestras por potrero).

Para el diseño y muestreo del suelo para identificar los microorganismos se recolectaron muestras suelo para identificar los microorganismos, que consiste en obtener monolitos de $25 \times 25 \times 30$ cm de profundidad. En potreros con pastoreo extensivo, se diseñó un transecto que se recorrió en zigzag para extraer un monolito cada 20 m ($n = 4$ por potrero). En potreros con ganadería regenerativa se eligieron los mismos potreros donde se obtuvieron muestras de suelo para análisis ($n = 4$).

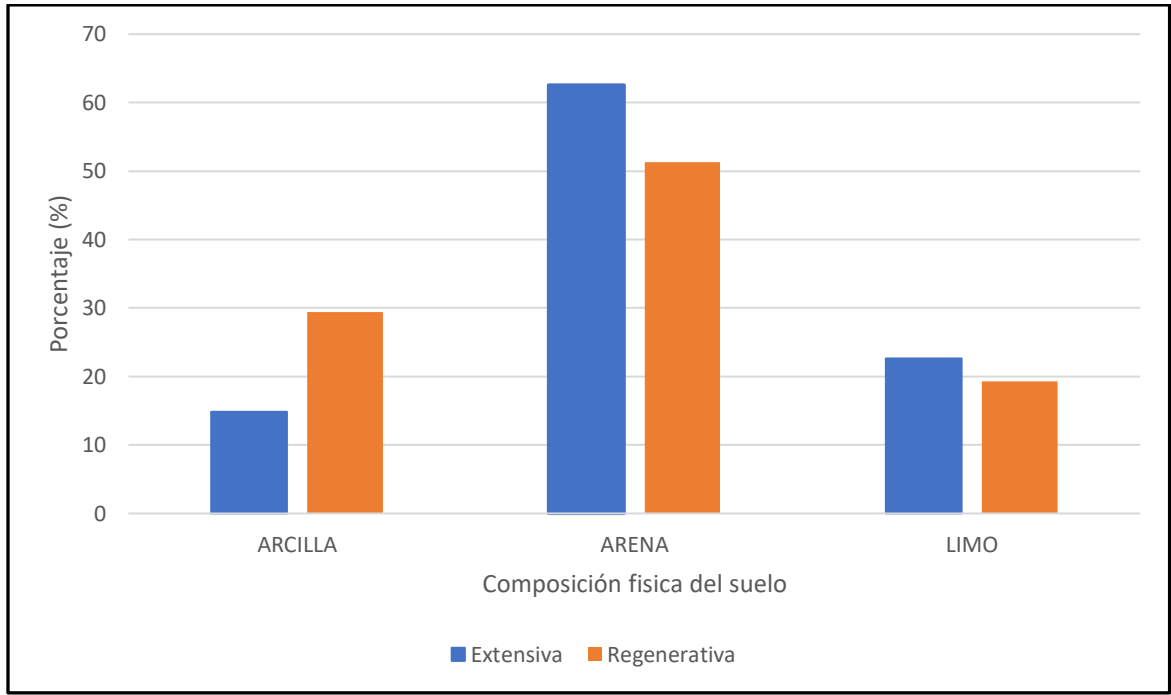
6. Resultados y discusión

6.1. Ubicación

El modelo de ganadería regenerativa y el modelo de ganadería extensiva se encuentran ubicados en un ecosistema de bosque seco tropical en la ciudad de Ibagué, específicamente en la vereda Aparco. Esta región comprende gran parte del abanico de Ibagué y se caracteriza por su actividad agropecuaria, principalmente el cultivo de arroz y la implementación de modelos de ganadería tradicional o extensiva (González & Herrera, 2019). Los suelos de Aparco son naturalmente franco-arcillosos y fértiles debido al enriquecimiento con cenizas del Nevado del Tolima; sin embargo, debido a las actividades antrópicas, se han observado procesos de compactación y erosión en el suelo (Rodríguez et al., 2020; Instituto Humboldt, 2021).

6.1.3 Caracterización fisicoquímica de suelos

Figura 1. Composición física del suelo de los modelos de ganadería extensiva y regenerativa ubicados en la vereda Aparco, Ibagué – Tolima.



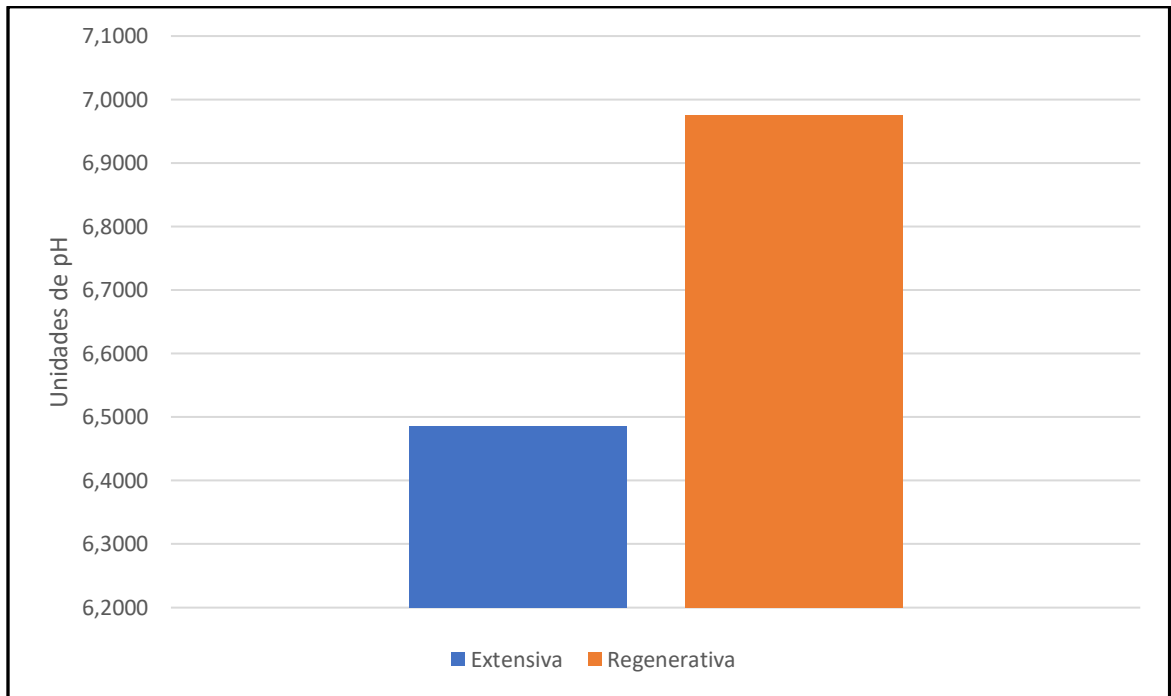
Fuente: Flomin R., J. S., 2024

En el modelo de ganadería extensiva, se puede observar que los suelos son de textura arenosa o areno-limosa, lo cual dificulta la retención de humedad y limita la capacidad de los suelos para sostener nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas (Gómez & Pérez, 2018). Por otro lado, en el modelo de ganadería regenerativa, se evidencia que hay una mayor presencia de arcilla en la composición del suelo que da lugar a texturas más arcillosas o franco-arcillosas. Este tipo de suelo ofrece ventajas significativas, porque la arcilla permite un mayor intercambio catiónico una propiedad fundamental para la fertilidad del suelo (Rodríguez et al., 2020). El intercambio catiónico es un proceso en el cual partículas cargadas negativamente en los minerales del suelo (como la arcilla) retienen y liberan cationes, como calcio, magnesio y potasio, que son esenciales para las plantas (López et al., 2021). Esto no solo mejora la fertilidad

del suelo al aumentar la disponibilidad de nutrientes, sino que también contribuye a una mejor estructura del suelo, favoreciendo la retención de agua y promoviendo un ambiente saludable para las raíces (Instituto Humboldt, 2019).

6.1.4. Determinación de los cambios de la materia orgánica y la disponibilidad mineral de los suelos en ambos sistemas de producción ganadera en la zona bajo estudio

Figura 2. Análisis del pH del suelo de modelos ganadería extensiva y ganadería regenerativa ubicados en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.



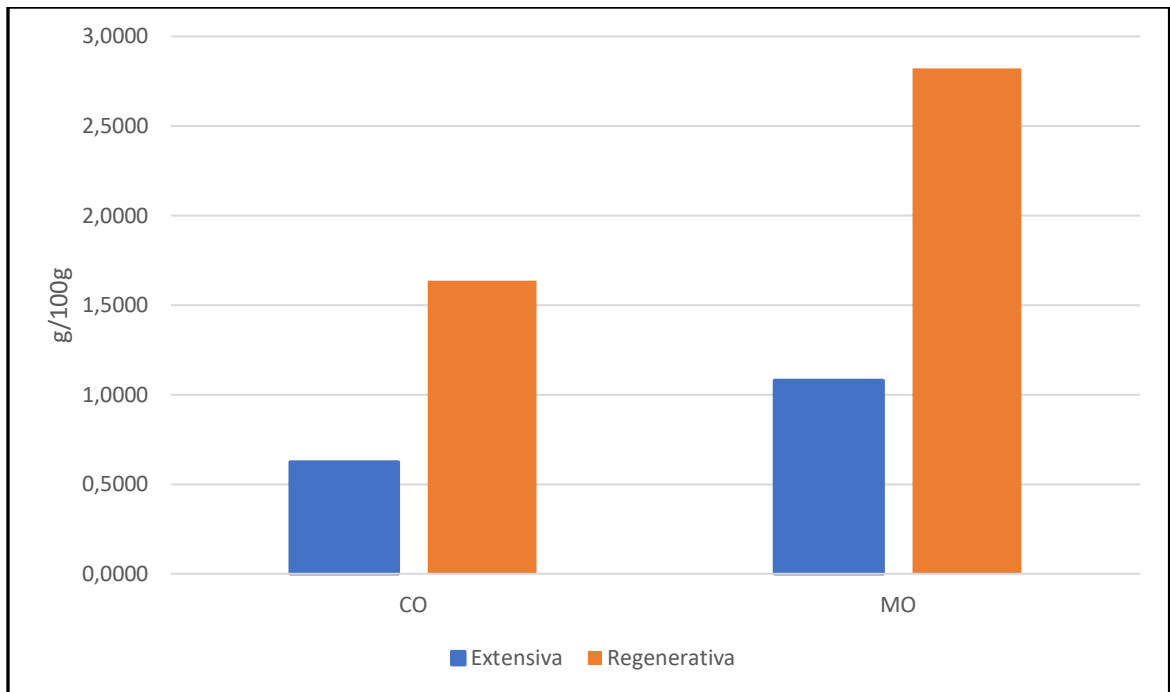
Fuente: Flomin R., J. S., 2024

En el análisis de pH realizado en suelos bajo manejo de ganadería extensiva y ganadería regenerativa, se observan diferencias relevantes que permiten inferir acerca del estado de salud del suelo en ambos sistemas productivos.

El pH del suelo en la parcela de ganadería extensiva presenta un valor de 6,4850, que, aunque está dentro de un rango aceptable para muchos cultivos y actividades agropecuarias, se encuentra en el límite inferior del rango ideal. Este valor indica una tendencia hacia la acidez que, si no se gestiona adecuadamente, puede limitar la disponibilidad de ciertos nutrientes esenciales, como el fósforo, el magnesio y el calcio, y fomentar la solubilidad de metales tóxicos como el aluminio (Lal, 2021). A largo plazo, esta leve acidez podría generar efectos negativos sobre la fertilidad del suelo y la productividad de los pastizales. Es probable que la compactación del suelo y la baja rotación de cultivos, características comunes de los sistemas de ganadería extensiva, contribuyan a esta acidez (Hassan et al., 2020).

En contraste, el pH del suelo bajo ganadería regenerativa es de 6,9750, lo que lo sitúa muy cerca de la neutralidad. Este valor sugiere un suelo más saludable y equilibrado, con una mayor disponibilidad de nutrientes y una actividad microbiana más activa y diversa. La ganadería regenerativa promueve prácticas que favorecen la regeneración del suelo, como el pastoreo rotacional, alta carga instantánea, ley de la ocupación y la cobertura vegetal permanente, lo que ayuda a mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo (Teague & Barnes, 2017). Este tipo de manejo tiende a mejorar la calidad del suelo y a mitigar la acidificación, ya que aumenta la materia orgánica y fomenta un ciclo de nutrientes más eficiente.

Figura 3. *Contenido de Carbono Orgánico y Materia Orgánica en los suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa ubicados en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.*



Fuente: Flomin R., J. S., 2024

En el análisis de Carbono Orgánico y Materia Orgánica en suelos manejados bajo ganadería extensiva y ganadería regenerativa, se evidencia que hay gran diferencia en el contenido de ambas lo que permiten entender mejor el impacto de cada sistema sobre la salud del suelo.

El contenido de carbono orgánico en suelos sanos suele variar dependiendo de factores como el tipo de suelo, el clima y el uso del suelo, pero generalmente se considera que un suelo saludable contiene entre 2 y 5 gramos de carbono orgánico por cada 100 gramos de suelo. (Janzen et al., 2017). Los suelos con niveles de carbono en este rango suelen estar en buen estado

de conservación y pueden sostener una diversidad biológica robusta, mantener su estructura y apoyar el crecimiento de las plantas de manera óptima (Lal, 2018).

El valor de Carbono Orgánico en el suelo de la parcela manejada bajo ganadería extensiva es de 0,6250 g/100g, lo cual es un indicativo de bajos niveles de materia orgánica y por ende de una reducida capacidad de secuestro de carbono en el suelo. Este nivel bajo sugiere que la estructura del suelo se encuentra debilitada, con una menor capacidad para retener agua y nutrientes. La baja acumulación de carbono en sistemas de ganadería extensiva se asocia generalmente con un manejo inadecuado del pastoreo y la falta de rotación de cultivos, lo que lleva a una degradación progresiva del suelo y la pérdida de biodiversidad del suelo (Conant et al., 2017).

El contenido de materia orgánica en suelos sanos suele estar entre 3 y 6 gramos por cada 100 gramos de suelo (es decir, entre un 3% y un 6% de la masa total del suelo), aunque esta cantidad puede variar según el tipo de suelo, el clima y las prácticas de manejo (Lal, 2018). Los suelos que mantienen estos niveles de materia orgánica tienden a ser más fértiles y estructuralmente estables, lo cual facilita la retención de agua y nutrientes, proporcionando un entorno ideal para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiana (Brady & Weil, 2017).

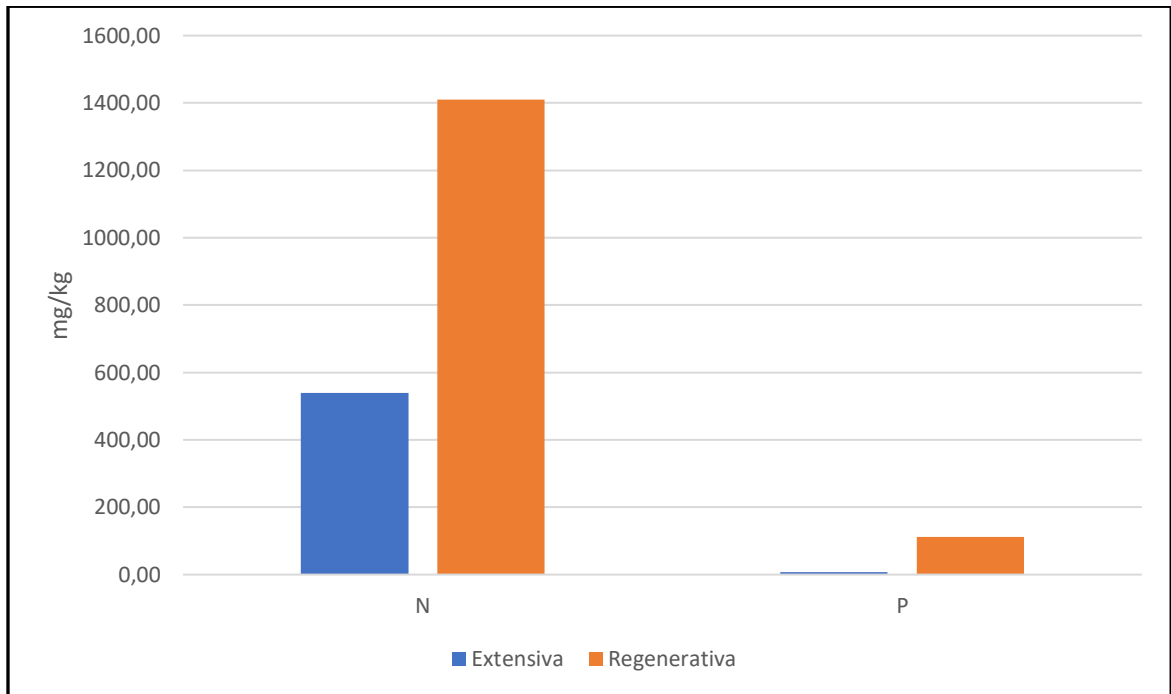
En cuanto al contenido de Materia Orgánica en el predio de ganadería extensiva el valor es de 1,0800 g/100g, un contenido bajo para suelos destinados a la producción agropecuaria. Esto se correlaciona con una baja actividad biológica en el suelo, lo que limita la capacidad de este para reciclar nutrientes de manera eficiente. En sistemas de ganadería extensiva, la pérdida

de materia orgánica suele deberse al sobrepastoreo, la compactación del suelo y la disminución de la cobertura vegetal, lo que contribuye a la erosión y la pérdida de nutrientes (Lal, 2015).

Por otro lado, los suelos bajo ganadería regenerativa presentan un valor de Carbono Orgánico de 1,6350 g/100g, un nivel considerablemente más alto en comparación con la ganadería extensiva. Este aumento de carbono en el suelo indica una mayor capacidad de secuestro de carbono y una mejora en la estructura del suelo, lo que a su vez facilita una mayor retención de agua y una mejor absorción de nutrientes. Estos niveles reflejan los beneficios del manejo regenerativo, que incluye prácticas como el pastoreo rotacional, la siembra de cultivos de cobertura y la promoción de la biodiversidad del suelo, todas estrategias que fomentan la acumulación de carbono en el suelo (Teague & Kreuter, 2020).

El valor de Materia Orgánica en la ganadería regenerativa es de 2,8200 g/100g, lo que es un claro indicador de un suelo mucho más saludable. Un mayor contenido de materia orgánica sugiere una mayor actividad biológica, que ayuda a mejorar la fertilidad del suelo y a fomentar un ciclo de nutrientes más eficiente. Además, los altos niveles de materia orgánica contribuyen a la resiliencia del suelo frente a cambios climáticos, ya que permiten retener más agua y mejorar la resistencia a la erosión (Pereira et al., 2018).

Figura 4. Contenido de Nitrógeno y Fósforo en los suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa ubicados en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.



Fuente: Flomin R., J. S., 2024

En el análisis de Nitrógeno (N) y Fósforo (P) en suelos bajo manejo de ganadería extensiva y regenerativa, se observan diferencias claras que permiten evaluar el impacto de cada sistema productivo sobre la fertilidad y salud del suelo.

El valor de Nitrógeno en el suelo bajo manejo de ganadería extensiva es de 540,00 mg/kg. Este nivel es relativamente bajo, lo que sugiere una limitación en la cantidad de este macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Los suelos con niveles bajos de nitrógeno suelen estar asociados con una baja disponibilidad de materia orgánica y una actividad biológica reducida (Marschner, 2012). En sistemas de ganadería extensiva, la compactación del suelo y la falta de manejo adecuado del pastoreo pueden disminuir los niveles de nitrógeno

debido a la limitada incorporación de residuos orgánicos al suelo y la lixiviación de este nutriente (Lemaire et al., 2011).

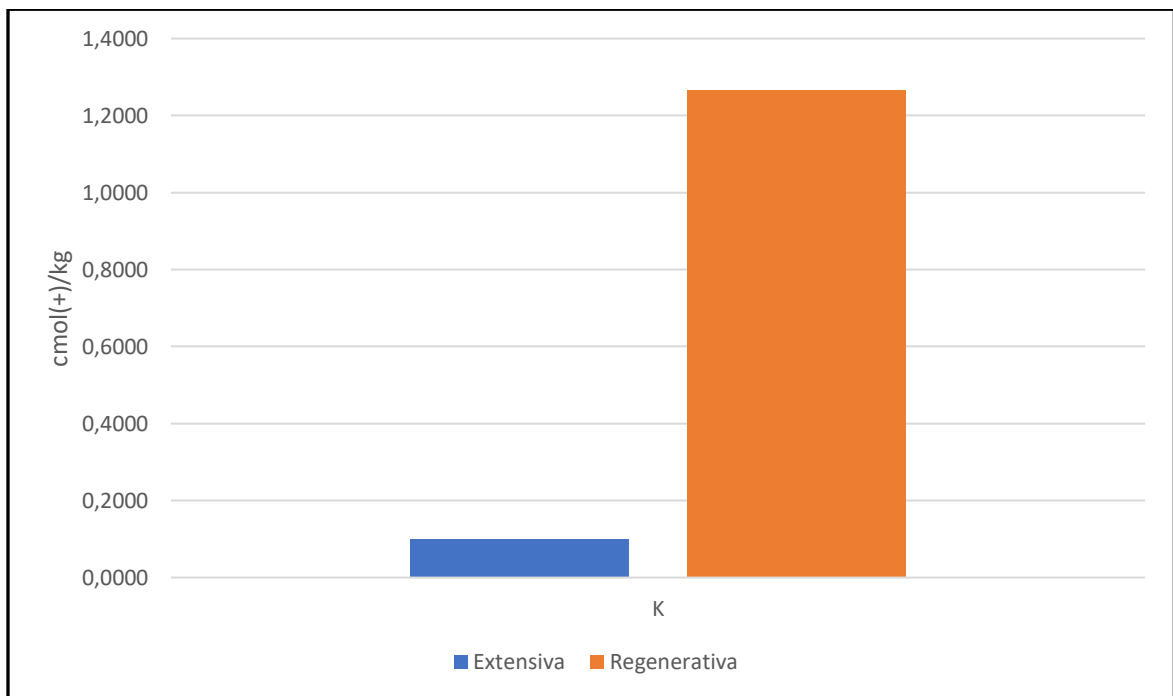
El valor de Fósforo en este suelo es de 7,3800 mg/kg, lo cual es muy bajo. El fósforo es un nutriente clave para el desarrollo radicular y el rendimiento de las plantas, pero su baja movilidad en el suelo hace que su deficiencia sea común en suelos manejados de manera intensiva sin reposición de nutrientes. En sistemas de ganadería extensiva, la deficiencia de fósforo suele ser un problema debido a la extracción constante del suelo por parte de las plantas y animales sin una adecuada fertilización (Sánchez, 2019).

En contraste, los suelos bajo ganadería regenerativa muestran un valor de Nitrógeno de 1410,0 mg/kg, un nivel mucho más elevado que el observado en la ganadería extensiva. Este incremento significativo en el contenido de nitrógeno se asocia con un mayor aporte de materia orgánica, derivado de prácticas como el pastoreo rotacional, la siembra de cultivos de cobertura y el manejo adecuado de la fertilidad del suelo (Teague & Barnes, 2017). El aumento del nitrógeno refleja una mayor capacidad del suelo para sostener el crecimiento vegetal y una mayor actividad microbiana, que es fundamental para el ciclo del nitrógeno en el suelo.

El contenido de Fósforo en el suelo de ganadería regenerativa es de 111,40 mg/kg, lo que representa un nivel óptimo para la mayoría de los cultivos y pastizales. Este incremento se debe, probablemente, a la implementación de prácticas que promueven la ciclicidad de nutrientes, como la integración de cultivos perennes y leguminosas, y la disminución de la compactación del suelo, lo que mejora la disponibilidad de fósforo. En sistemas regenerativos, es común ver que el

reciclaje eficiente de nutrientes mejora la biodisponibilidad de elementos esenciales como el fósforo (Pereira et al., 2018). Además, los mayores niveles de fósforo favorecen el crecimiento radicular y la mejora general del vigor de las plantas, lo que a su vez contribuye a la regeneración del suelo y la sostenibilidad del sistema.

Figura 5. Contenido de Potasio en los suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa ubicados en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.



Fuente: Flomin R., J. S., 2024

El análisis de potasio (K) en suelos bajo manejo de ganadería extensiva y ganadería regenerativa, se observan diferencias significativas que permiten evaluar el impacto de cada sistema sobre la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas.

El valor de potasio en el suelo bajo manejo de ganadería extensiva es de 0,1000 cmol(+)/kg, lo cual es extremadamente bajo. El potasio es un macronutriente esencial para las plantas, jugando un rol fundamental en la regulación de la absorción de agua, la fotosíntesis y el

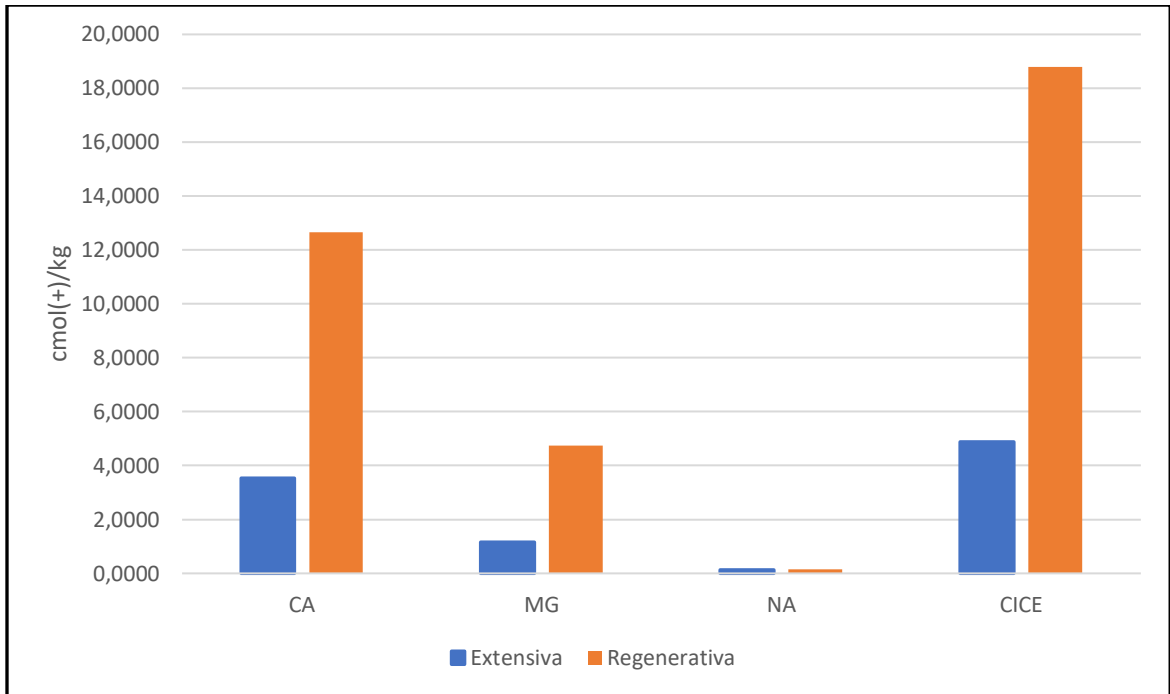
transporte de nutrientes. Cuando los niveles de potasio son tan bajos, como en este caso, se pueden observar efectos negativos en la calidad del pastizal y en la productividad general del sistema (White & Karley, 2010).

Este bajo nivel de potasio puede estar relacionado con la extracción continua de este nutriente por las plantas y los animales, sin la reposición adecuada, lo cual es típico en sistemas de ganadería extensiva donde hay poca o nula fertilización (Lal, 2015). Además, en sistemas extensivos, el sobrepastoreo y la compactación del suelo pueden reducir la capacidad de las plantas para absorber los nutrientes disponibles, exacerbando la deficiencia de potasio.

En contraste, el análisis de potasio en el suelo bajo ganadería regenerativa muestra un valor de 1,2650 cmol(+)/kg, un nivel considerablemente más alto. Este valor refleja un suelo mucho más saludable y fértil, con una mayor capacidad para sostener la producción agrícola y el crecimiento de los pastizales. El manejo regenerativo, que incluye prácticas como el pastoreo rotacional y el uso de cultivos de cobertura, mejora la estructura del suelo y aumenta la materia orgánica, lo que favorece la retención de nutrientes como el potasio (Teague & Barnes, 2017).

La mayor cantidad de potasio en los suelos regenerativos no solo asegura un mejor crecimiento de las plantas, sino que también mejora la resistencia de los pastos a condiciones adversas como la sequía y las plagas (Pereira et al., 2018).

Figura 6. Concentración de Calcio (CA), Magnesio (MG), Sodio (NA), y Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.



Fuente: Flomin R., J. S., 2024

En este análisis de suelos, se evalúan los niveles de calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y la capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) en sistemas de ganadería extensiva y regenerativa. Estos elementos y parámetros son fundamentales para la salud del suelo y la productividad agrícola, ya que determinan la fertilidad y la capacidad del suelo para retener nutrientes esenciales.

En el sistema de ganadería extensiva, el valor de calcio es de 3,5400 cmol(+)/kg, un nivel moderado que sugiere una limitación en la disponibilidad de este nutriente. El calcio es esencial para la estructura del suelo y el desarrollo de las plantas, ya que influye en la calidad del crecimiento radicular y en la neutralización de los ácidos del suelo (Brady & Weil, 2017). Este

nivel moderado puede deberse a la extracción continua del calcio sin un manejo adecuado de la fertilización o la reposición de nutrientes.

El nivel de magnesio en este suelo es de 1,1600 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, lo que también se considera relativamente bajo. El magnesio es un componente crucial de la clorofila y está directamente involucrado en la fotosíntesis. Su bajo nivel puede influir negativamente en la productividad del forraje y en la capacidad del suelo para sostener una cubierta vegetal sana (Marschner, 2012).

El sodio, por otro lado, tiene un valor de 0,1400 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, lo que está dentro de un rango aceptable, dado que niveles elevados de sodio pueden generar problemas de salinidad y afectar la estructura del suelo, haciéndolo menos permeable y más propenso a la compactación (Lal, 2015). Afortunadamente, en este caso, el sodio no parece ser un problema significativo.

La capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) es de 4,8850 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$. Este valor indica una baja capacidad del suelo para retener cationes (nutrientes esenciales) como calcio, magnesio y potasio, lo que reduce la fertilidad y afecta negativamente la productividad agrícola. Suelos con una CICE baja tienen menor capacidad para almacenar y proporcionar nutrientes a las plantas, lo que puede deberse a una baja materia orgánica y a una degradación de la estructura del suelo (White & Karley, 2010).

En contraste, el análisis de suelos bajo ganadería regenerativa muestra un valor de calcio de 12,660 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, lo que indica un suelo mucho más rico en este nutriente. Este alto contenido de calcio es indicativo de un suelo bien estructurado y más fértil, lo que promueve un

mejor crecimiento radicular y una mayor capacidad para soportar actividades productivas sostenibles (Teague & Barnes, 2017). El aumento en los niveles de calcio puede estar relacionado con prácticas de manejo que incluyen la adición de enmiendas orgánicas y el pastoreo rotacional, lo que mejora la estructura y la capacidad del suelo para retener nutrientes.

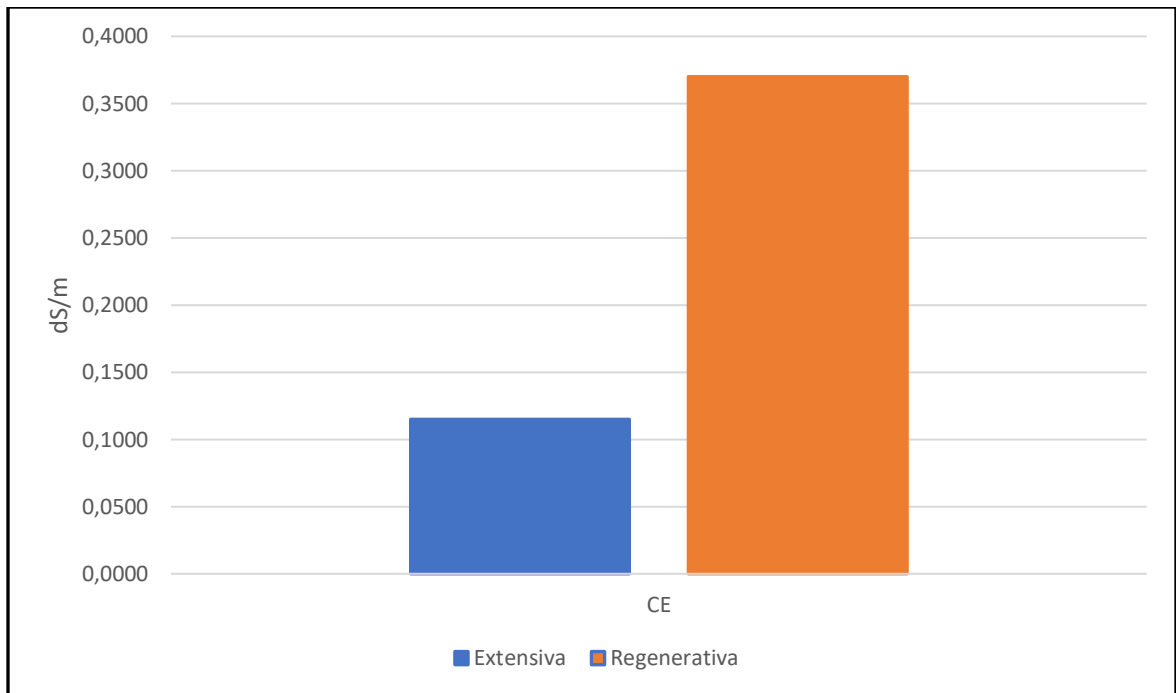
El magnesio tiene un valor de 4,7400 cmol(+)/kg en el suelo regenerativo, lo que es significativamente mayor en comparación con el sistema extensivo. Este valor indica una mayor disponibilidad de magnesio, lo que se traduce en un mejor rendimiento de los cultivos y pastizales, y una mayor eficiencia en la fotosíntesis de las plantas (Marschner, 2012). Esta diferencia refleja los beneficios de las prácticas regenerativas, que suelen mejorar la fertilidad del suelo mediante la incorporación de materia orgánica y la reducción del impacto negativo del sobrepastoreo.

El nivel de sodio en el suelo regenerativo es de 0,1500 cmol(+)/kg, un valor ligeramente superior al de la ganadería extensiva, pero aún dentro de un rango seguro. Esto significa que no hay riesgo de salinidad en el suelo, lo cual es crucial para mantener una buena estructura del suelo y evitar problemas relacionados con la compactación y la baja permeabilidad (Lal, 2015).

La CICE en este suelo es de 18,800 cmol(+)/kg, lo que indica una excelente capacidad del suelo para retener y suministrar cationes esenciales. Una CICE alta es indicativa de un suelo con alta fertilidad, que tiene la capacidad de almacenar nutrientes para ser utilizados por las plantas durante periodos más largos. Este resultado muestra que las prácticas regenerativas han

mejorado significativamente la capacidad del suelo para sostener ciclos de nutrientes de manera eficiente y sostenible, promoviendo un sistema productivo a largo plazo (Pereira et al., 2018).

Figura 7. *Determinación de la conductividad eléctrica en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.*



Fuente: Flomin R., J. S., 2024

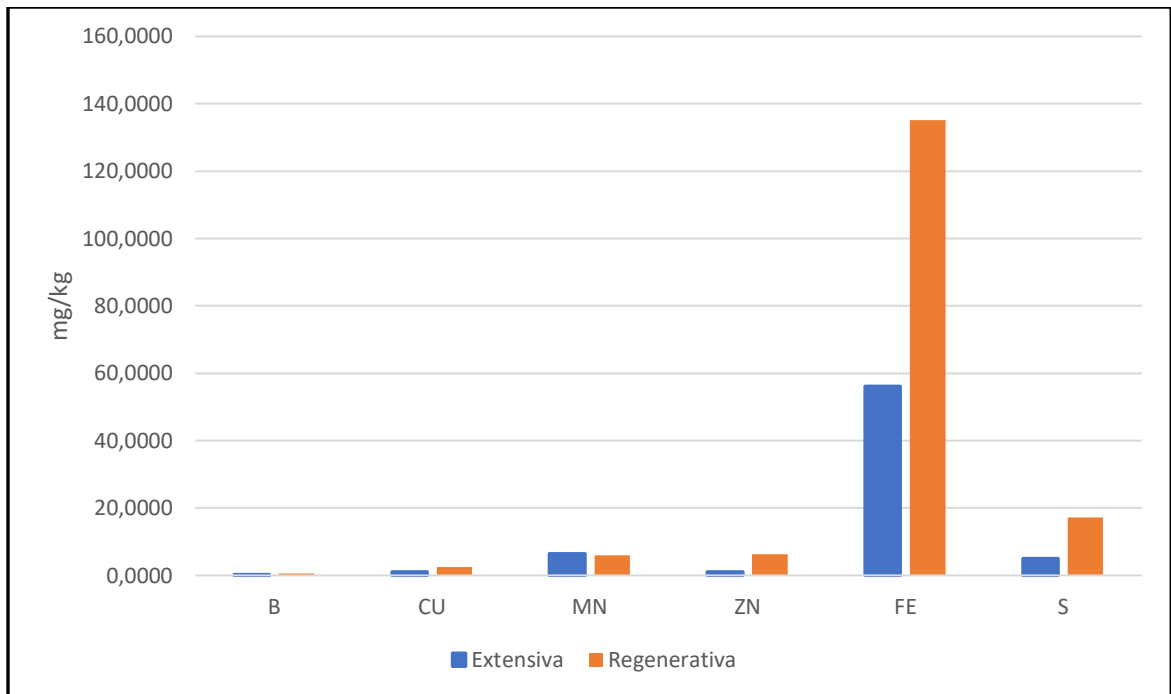
Los resultados indican una clara diferencia en la conductividad eléctrica entre los dos sistemas de manejo. La CE de 0,1150 dS/m observada en suelos de ganadería extensiva sugiere un nivel bajo de salinidad, lo que puede ser indicativo de una menor acumulación de sales en el suelo. Esto es relevante, dado que los sistemas de ganadería extensiva suelen asociarse con prácticas que pueden llevar a una degradación del suelo y, por ende, a un incremento en la salinidad debido a la erosión y la compactación (Hernández et al., 2020).

Por otro lado, la CE de 0,3700 dS/m en suelos de ganadería regenerativa sugiere una mayor acumulación de sales. Este hallazgo puede parecer contraproducente; sin embargo, en el contexto de la ganadería regenerativa, es posible que un mayor nivel de CE esté asociado con un manejo que promueve la diversidad de especies y el uso de enmiendas orgánicas, lo que puede enriquecer el suelo y aumentar su capacidad de retención de nutrientes (González et al., 2022).

Es fundamental considerar que una conductividad eléctrica elevada no siempre es negativa, ya que puede estar vinculada a un incremento en la actividad microbiana y una mayor disponibilidad de nutrientes (López & Ramos, 2021). Esto contrasta con la ganadería extensiva, donde la presión sobre los recursos naturales a menudo conduce a la degradación del suelo y una menor biodiversidad.

Además, la gestión sostenible en la ganadería regenerativa, que incluye prácticas como el pastoreo rotacional y la integración de cultivos, puede contribuir a mejorar la estructura del suelo y su capacidad para retener agua y nutrientes, lo que a su vez puede influir positivamente en la CE (Smith et al., 2020).

Figura 8. Análisis químico de suelos, concentración de Boro (B), Cobre (CU), Manganeso (MN), Zinc (ZN), Hierro, (FE), y Azufre (S) en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.



Fuente: Flomin R., J. S., 2024

Al realizar un análisis de suelos entre sistemas de ganadería extensiva y regenerativa, se observan importantes diferencias en la concentración de micronutrientes esenciales como boro, cobre, manganeso, zinc, hierro y azufre. Estos elementos son vitales para la salud del suelo y el desarrollo de los cultivos. A continuación, se detallan las observaciones basadas en los valores obtenidos para ambos sistemas.

El valor del Boro en el modelo de ganadería extensiva es de 0,2000 mg/kg indicando una cantidad baja de este micronutriente. El boro es esencial para la formación de las paredes celulares en las plantas y su deficiencia puede afectar la calidad del forraje y de los cultivos en general. Este bajo nivel en el sistema extensivo podría resultar en una productividad reducida,

por otro lado, en el sistema regenerativo, el boro tiene un valor de 0,5350 mg/kg representa un aumento significativo en la concentración de boro, lo cual favorece un mejor crecimiento de las plantas y un desarrollo radicular más fuerte, mejorando la absorción de otros nutrientes (Shorrocks, 1997).

Con 1,0000 mg/kg, el cobre en la ganadería extensiva está en el rango bajo de lo requerido por las plantas. Es esencial para procesos enzimáticos y la fotosíntesis, por lo que una deficiencia puede limitar el crecimiento del pasto y el rendimiento del suelo a largo plazo (Marschner, 2012).

Mientras que en la ganadería regenerativa el cobre tiene un valor de 2,4650 mg/kg sugiere que el sistema regenerativo está mejorando la disponibilidad de cobre, lo cual es clave para la resistencia a enfermedades y la fotosíntesis. Este aumento apoya un crecimiento más vigoroso (Marschner, 2012).

El manganeso en la ganadería extensiva, se encuentra con valores de 6,4750 mg/kg, está dentro de un rango adecuado. Este micronutriente es clave para la fotosíntesis y otras reacciones enzimáticas. Aunque adecuado, la gestión del suelo extensivo podría requerir optimización para mantener este nivel estable (Kabata-Pendias, 2011).

Aunque en este encontramos que en el modelo de ganadería regenerativa la concentración de manganeso es ligeramente inferior al valor en la ganadería extensiva, con 6,0250 mg/kg, sigue

siendo un valor adecuado. El manganeso es esencial para muchas funciones enzimáticas, incluyendo la fotosíntesis (Kabata-Pendias, 2011).

El zinc se encuentra en una concentración de 1,0000 mg/kg, lo que sugiere que se encuentra en un nivel bajo. Este elemento es crucial para la síntesis de proteínas y el crecimiento de raíces. Los bajos niveles pueden limitar el desarrollo de los cultivos y afectar negativamente la productividad agrícola (Alloway, 2008).

Se puede evidenciar que en la ganadería regenerativa hay un incremento, pues su valor es de 6,2800 mg/kg es significativo y demuestra que el suelo regenerativo es mucho más rico en este nutriente. El zinc es esencial para la producción de hormonas de crecimiento y para mejorar la tolerancia al estrés en las plantas (Alloway, 2008).

En la ganadería extensiva el valor de 56,170 mg/kg de hierro está dentro de un rango aceptable, aunque su disponibilidad puede verse afectada por el pH del suelo. El hierro es necesario para la síntesis de clorofila, lo que influye directamente en el vigor de las plantas (Lindsay & Schwab, 1982).

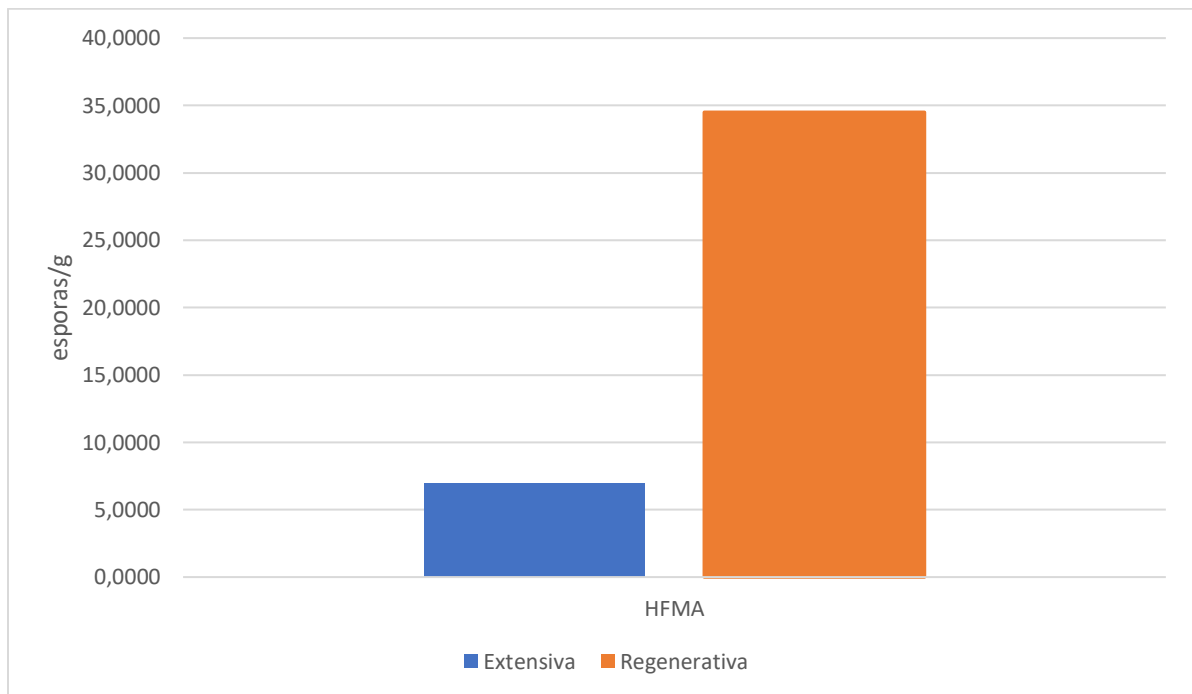
Con 135,15 mg/kg, nuevamente el hierro en el suelo regenerativo es mucho más abundante, lo cual es positivo para mejorar la eficiencia fotosintética y la salud general de los cultivos. El hierro es fundamental para la producción de clorofila y su nivel elevado puede indicar un suelo más saludable (Lindsay & Schwab, 1982).

En la ganadería extensiva su valor es de 4,9550 mg/kg, el azufre es fundamental para la formación de aminoácidos y proteínas en las plantas. Sin embargo, este valor relativamente bajo podría restringir el crecimiento óptimo de los cultivos en el sistema extensivo (Jamal et al., 2010).

Al contrario, en la ganadería regenerativa el valor de 17,255 mg/kg de azufre es mucho mayor en comparación con el sistema extensivo. Esto refuerza la capacidad del suelo para producir proteínas y aminoácidos esenciales, mejorando la productividad agrícola y la salud del suelo en el largo plazo (Jamal et al., 2010).

6.1.5. Evaluación del contenido de esporas de hongos formadoras de micorrizas arbusculares, el recuento de bacterias presuntivas fijadoras de nitrógeno, y de unidades formadoras de colonia de rizobios en suelo en ambos agro ecosistemas bajo estudio.

Figura 9. *Análisis biológico de suelos, cuantificación de esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.*



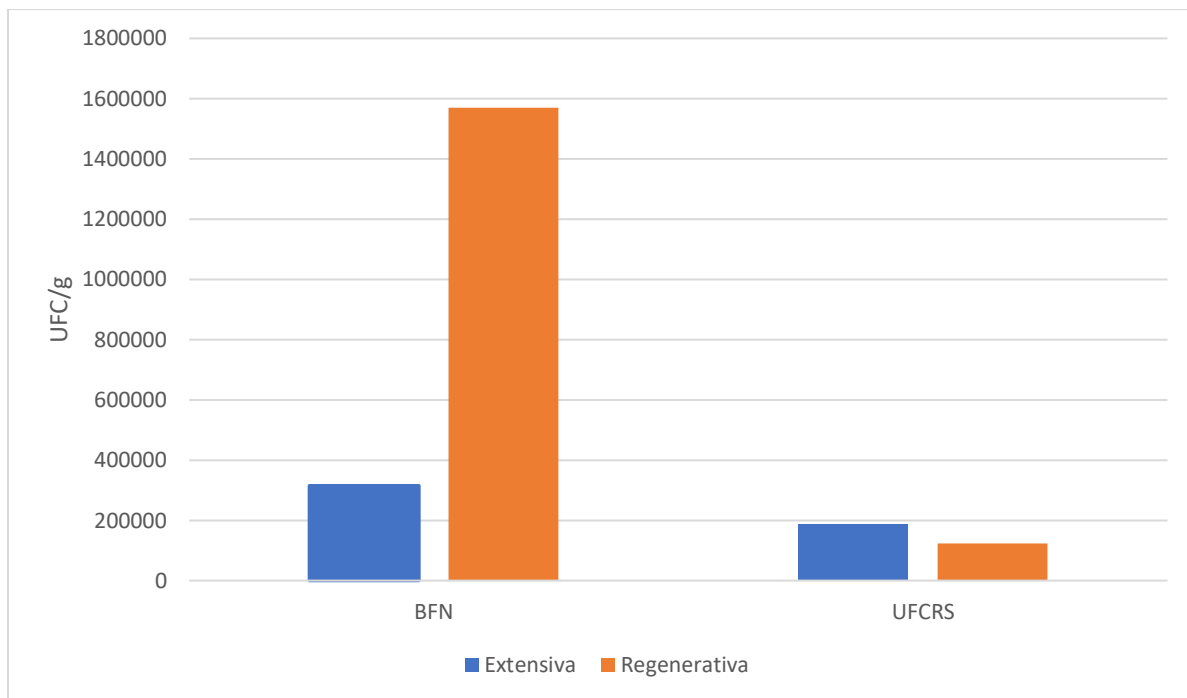
Fuente: Flomin R., J. S., 2024

Al realizar el análisis de suelos en cuanto a la cuantificación de esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) en sistemas de ganadería extensiva y regenerativa, se observan diferencias notables que indican la influencia positiva de la regeneración del suelo en la microbiología del suelo. Los valores obtenidos para la ganadería extensiva muestran 7,000 esporas/g de suelo, mientras que en el sistema regenerativo se cuantifican 34,500 esporas/g, lo que supone un incremento considerable.

En la ganadería extensiva, donde el uso intensivo del suelo y la ausencia de prácticas regenerativas dominan, la baja presencia de esporas de micorrizas arbusculares son un indicador de la degradación de la salud del suelo. Los hongos micorrícicos arbusculares son fundamentales para la simbiosis con las raíces de las plantas, permitiendo un mayor acceso a nutrientes, especialmente fósforo, y mejorando la estructura del suelo (Smith & Read, 2008). La baja cuantificación de esporas, 7,000 esporas/g, podría estar relacionada con el empobrecimiento de la biodiversidad del suelo y la falta de materia orgánica, lo que limita el desarrollo de esta simbiosis beneficiosa (Brundrett, 2009).

En contraste, el sistema de ganadería regenerativa presenta un valor de 34,500 esporas/g, lo que refleja una mejor salud del suelo y un entorno favorable para la proliferación de hongos micorrícicos. Este alto valor es un claro indicador de que la regeneración del suelo, con prácticas que promueven la biodiversidad y la cobertura vegetal, facilita la creación de un hábitat adecuado para estos organismos (Cameron et al., 2013). La mayor presencia de esporas implica una mejora en la capacidad del suelo para retener nutrientes, promover el crecimiento de las plantas y aumentar la resiliencia ante condiciones climáticas adversas. Esto sugiere que los suelos regenerados tienen una mayor capacidad para secuestrar carbono y para mantener ciclos de nutrientes más eficientes, favoreciendo un ecosistema más sostenible (Leifheit et al., 2015).

Figura 10. Análisis biológico de suelos, recuento de bacterias presuntivas fijadoras de nitrógeno y recuento de unidades formadoras de colonia de rizobios en suelos de ganadería extensiva y ganadería regenerativa en la vereda Aparco. Ibagué – Tolima.



Fuente: Flomin R., J. S., 2024

El análisis del recuento de bacterias presuntivas fijadoras de nitrógeno (BPF) y de rizobios en suelos bajo sistemas de ganadería extensiva y regenerativa revela diferencias fundamentales en la salud microbiológica del suelo, que reflejan la calidad del manejo agrícola y su impacto en los ciclos biogeoquímicos, especialmente en la fijación biológica de nitrógeno.

En el caso de la ganadería extensiva, los resultados indican un recuento de bacterias presuntivas fijadoras de nitrógeno de 315,050 UFC/g y un recuento de unidades formadoras de colonia (UFC) de rizobios de 186,500 UFC/g. Estos valores son relativamente bajos y reflejan las limitaciones de este sistema de manejo en términos de actividad microbiana benéfica. La presencia reducida de bacterias fijadoras de nitrógeno indica que el ciclo del nitrógeno está

siendo menos eficiente, lo que puede llevar a una mayor dependencia de fertilizantes externos y una menor sostenibilidad del sistema productivo (Ladha et al., 1997).

Las bacterias fijadoras de nitrógeno, como los rizobios, son clave para convertir el nitrógeno atmosférico en formas utilizables por las plantas (nitrato y amonio). El bajo número de rizobios puede deberse a prácticas de manejo que no favorecen la actividad biológica, como el uso excesivo de agroquímicos, el sobrepastoreo y la compactación del suelo. Esto reduce la capacidad de los suelos para mantener un equilibrio sostenible en términos de fertilidad natural (Marschner, 2012).

En comparación, el sistema de ganadería regenerativa muestra un incremento notable en el recuento de bacterias fijadoras de nitrógeno con 1,570,000 UFC/g, lo que representa un aumento significativo en la actividad microbiológica beneficiosa. Esta cantidad mucho mayor sugiere que las prácticas regenerativas, como el manejo holístico del pastoreo, la rotación de cultivos y la incorporación de plantas leguminosas, están creando un entorno más favorable para la proliferación de estas bacterias. Esto resulta en una mayor fijación de nitrógeno de forma natural, mejorando la fertilidad del suelo sin la necesidad de insumos sintéticos (van der Heijden et al., 2008).

Por otro lado, el recuento de rizobios en el suelo regenerativo, aunque ligeramente inferior con 124,050 UFC/g en comparación con el sistema extensivo, aún es significativo y suficiente para sostener una buena simbiosis con las leguminosas. La disminución del número de rizobios puede deberse a una menor necesidad de estos en sistemas donde otras bacterias

fijadoras de nitrógeno juegan un rol destacado (Vessey, 2003). En cualquier caso, el sistema regenerativo equilibra las diversas especies de microorganismos en el suelo, lo que puede contribuir a una mayor resiliencia frente a variaciones ambientales.

6.1.6. Discusión

De acuerdo con esta investigación, los niveles de nitrógeno pueden variar considerablemente según las prácticas de manejo del suelo, las rotaciones de cultivos, la fertilización y la mineralización de la materia orgánica; Además, el nitrógeno es un nutriente altamente dinámico que puede ser fácilmente perdido por lixiviación o volatilización, lo que afecta su disponibilidad en el suelo (Brady & Weil, 2016).

Mientras que en el predio de ganadería extensiva se implementa un modelo de pastoreo selectivo y el ganado está en lotes de gran extensión por periodos aproximados entre 30 y 60 días, y periodos de descanso de 30 días lo que hace que la concentración de nitrógeno sea menor y este en declive pues al implementarse el modelo de ganadería extensiva se somete el suelo a procesos de erosión y degradación , mientras que en el predio de ganadería regenerativa se implementa un sistema de pastoreo no selectivo, pues se hace pastoreo rotacional, con periodos de ocupación de un día por potrero, alta carga instantánea y periodos de descanso que oscilan entre los 60 y 170 días haciendo que el nitrógeno aumente progresivamente, por tener periodos de ocupación cortos, largos periodos de descanso, praderas polifíticas, la gran concentración de desechos excretados por el ganado y por el pastoreo actuando con las dinámicas naturales.

Los datos de pH muestran que la ganadería regenerativa está contribuyendo a la salud del suelo de manera más eficaz que la ganadería extensiva. El manejo regenerativo ofrece un

enfoque más sostenible al mantener los suelos en un estado más cercano a la neutralidad, promoviendo así una mayor productividad y sostenibilidad a largo plazo (Pereira et al., 2018).

Del mismo modo los datos muestran una clara ventaja del manejo regenerativo sobre el extensivo en cuanto a la acumulación de carbono y materia orgánica en el suelo. La ganadería regenerativa no solo contribuye a la sostenibilidad del sistema agropecuario, sino que también promueve la salud del suelo, lo que resulta en una mayor productividad y sostenibilidad a largo plazo. Estos resultados son consistentes con la literatura, que señala que los sistemas de manejo regenerativo son más efectivos para mejorar la calidad del suelo y mitigar el cambio climático a través del secuestro de carbono (Conant et al., 2017; Teague & Kreuter, 2020).

Se podría decir que el análisis comparativo de nitrógeno y fósforo entre los suelos manejados bajo ganadería extensiva y regenerativa revela una clara superioridad de la ganadería regenerativa en términos de fertilidad del suelo. La mayor concentración de ambos nutrientes bajo manejo regenerativo no solo favorece el crecimiento vegetal, sino que también contribuye a la sostenibilidad a largo plazo del ecosistema, aumentando la capacidad de secuestro de carbono y mejorando la salud general del suelo (Teague & Kreuter, 2020). Estos resultados sugieren que la ganadería regenerativa ofrece un enfoque más holístico para la gestión del suelo, en comparación con los sistemas extensivos, que tienden a agotar los recursos del suelo con el tiempo.

Cuando se analizan los resultados de los análisis de suelos de contenido de potasio se llega a la conclusión de que las prácticas de manejo regenerativo no solo restauran la fertilidad

del suelo, sino que también optimizan la eficiencia del ciclo de nutrientes, creando un sistema más sostenible y resiliente.

La comparación entre los niveles de potasio en suelos manejados bajo ganadería extensiva y regenerativa muestra una clara superioridad del enfoque regenerativo. Mientras que la ganadería extensiva agota los nutrientes del suelo, llevando a deficiencias críticas, la ganadería regenerativa ayuda a restaurar la fertilidad del suelo, mejorando la disponibilidad de potasio y promoviendo un sistema productivo más sostenible a largo plazo. Demostrando la importancia de implementar prácticas de manejo que favorezcan la regeneración del suelo y la sostenibilidad agroecológica (Teague & Kreuter, 2020).

Igualmente se puede afirmar que los suelos bajo ganadería regenerativa muestran una mejora significativa en la disponibilidad de calcio y magnesio, así como en la capacidad de intercambio catiónico efectivo, en comparación con los suelos manejados bajo ganadería extensiva. Estos resultados subrayan los beneficios de la ganadería regenerativa para mejorar la fertilidad del suelo, aumentar la disponibilidad de nutrientes esenciales y promover una mayor sostenibilidad a largo plazo en los sistemas agrícolas (Teague & Kreuter, 2020). La regeneración de los suelos mediante estas prácticas no solo mejora la salud del suelo, sino que también contribuye a la restauración de los ecosistemas y al incremento en la productividad agrícola.

Tomando datos de la comparación de la conductividad eléctrica entre los sistemas de ganadería extensiva y regenerativa revela diferencias importantes que reflejan las prácticas de manejo y su impacto en la salud del suelo. Mientras que la ganadería extensiva muestra un bajo

nivel de CE, la ganadería regenerativa presenta un valor más alto, lo que puede indicar una mayor actividad biológica y una gestión más holística del ecosistema.

Si nos centramos exclusivamente en los resultados estos muestran que la ganadería regenerativa proporciona un suelo más rico en micronutrientes esenciales como el boro, el cobre, el zinc, el hierro y el azufre, en comparación con la ganadería extensiva. Estos nutrientes no solo mejoran la calidad del suelo, sino que también promueven un crecimiento vegetal más vigoroso, lo que respalda la sostenibilidad y la eficiencia a largo plazo del sistema regenerativo.

En cuanto a la presencia de HFMA en los suelos de los dos modelos de ganadería se puede afirmar que el incremento en la cantidad de esporas de HFMA en el suelo regenerativo demuestra que las prácticas agrícolas que restauran la biodiversidad del suelo y promueven la salud del ecosistema son clave para mejorar la fertilidad del suelo a largo plazo. Por lo tanto, este análisis resalta la importancia de las prácticas regenerativas en la promoción de una agricultura más sostenible y resiliente, pues la ganadería regenerativa demuestra ser un modelo superior en términos de salud del suelo y biodiversidad microbiana en comparación con la ganadería extensiva. El aumento en la cantidad de esporas de hongos micorrícicos es un claro reflejo de la mejora en las condiciones del suelo, lo que tiene implicaciones positivas para la producción agrícola y la sostenibilidad ambiental.

Con base en lo anterior es correcto inferir que el análisis microbiológico del suelo muestra claramente que la ganadería regenerativa favorece un suelo más vivo y dinámico, con una mayor presencia de bacterias fijadoras de nitrógeno. Estos microorganismos no solo mejoran

la fertilidad del suelo, sino que también contribuyen a la captura de carbono, la mejora de la estructura del suelo y el mantenimiento de un sistema agrícola más sostenible (Drinkwater & Snapp, 2007). En contraste, la ganadería extensiva presenta limitaciones que comprometen la eficiencia biológica del suelo y aumentan la dependencia de insumos externos, lo que puede tener consecuencias negativas tanto para la productividad como para la sostenibilidad a largo plazo.

7. Conclusiones

La investigación realizada a cabo en el municipio de Ibagué, Tolima, resalta el enorme potencial de la ganadería regenerativa como una alternativa efectiva para mitigar los problemas ambientales generados por la ganadería extensiva, especialmente en el delicado ecosistema del bosque seco tropical. Este estudio ha demostrado que la implementación de prácticas regenerativas no solo ayuda a restaurar la salud del suelo y la biodiversidad, sino que también mejora el equilibrio hidrológico en un entorno que ha sido severamente deteriorado por décadas de manejo ganadero intensivo.

Uno de los hallazgos más relevantes de esta investigación es la mejora significativa en la salud del suelo, que se manifiesta a través de un aumento notable en la materia orgánica. Esta mejora es fundamental, ya que una mayor cantidad de materia orgánica no solo incrementa el contenido de nutrientes, sino que también reduce la compactación del suelo y mejora su estructura. Un suelo rico en materia orgánica actúa como un reservorio de agua, permitiendo que las plantas accedan a este recurso vital de manera más eficiente. Según Teague y Kreuter (2020), las técnicas regenerativas, como el manejo holístico del pastoreo y la siembra de especies forrajeras diversificadas, son efectivas para mejorar tanto la fertilidad como la estructura del suelo. Esto evidencia que, mediante prácticas adecuadas, es posible regenerar suelos que han sufrido degradación, apoyando así la producción sostenible de alimentos.

Además, se ha observado una notable recuperación de las micorrizas arbusculares, que son hongos que establecieron relaciones simbióticas con las raíces de las plantas. Esta relación es crucial para la absorción de nutrientes y mejora la salud general del suelo. En este sentido, la investigación documentó un aumento significativo en la colonización de raíces por estas micorrizas, lo cual resulta fundamental para la salud del ecosistema (Berruti et al., 2016). La evidencia sugiere que la ganadería regenerativa tiene la capacidad de revertir la pérdida de microorganismos beneficiosos, que generalmente se asocia con la degradación de los ecosistemas ganaderos extensivos (Solís & Rivera, 2019). La reintroducción de prácticas regenerativas ha permitido la reducción de especies invasoras en el suelo, creando condiciones más favorables para el establecimiento de micorrizas arbusculares, lo que, a su vez, promueve una mayor estabilidad ecológica al facilitar interacciones positivas entre las plantas y su entorno (Jeffries et al., 2003).

Desde el punto de vista hidrológico, los sistemas de ganadería regenerativa han mostrado mejoras notables en la capacidad de retención de agua en los suelos, gracias a la mayor concentración de materia orgánica y la cobertura vegetal que se establece en estos sistemas. La materia orgánica actúa como una esponja natural, mejorando la capacidad del suelo para retener agua y reduciendo la escorrentía, lo que es vital en un ecosistema vulnerable a la sequía como el bosque seco tropical. Esta capacidad de retención de agua no solo ayuda a regular el ciclo hidrológico, sino que también favorece la recarga de acuíferos, un aspecto crítico para la sostenibilidad de la agricultura en la región. La mayor cobertura vegetal y el uso de rotaciones planificadas de pastoreo son estrategias eficaces que demuestran cómo la ganadería regenerativa puede reducir la erosión y mejorar la infiltración de agua en el suelo (Nicholls et al., 2021).

Sin embargo, la adopción de prácticas regenerativas requiere un cambio de mentalidad profunda entre los productores. Es fundamental que los ganaderos comprendan que la sostenibilidad a largo plazo depende de la conservación de los recursos naturales. En este proceso, la educación y la asistencia técnica juegan un papel crucial para facilitar la transición hacia modelos de ganadería regenerativa. Además, es esencial que las políticas públicas se alineen con este enfoque, incentivando a los productores a adoptar prácticas sostenibles y reconociendo los servicios ecosistémicos que generan los sistemas ganaderos responsables.

Se puede concluir que, la ganadería regenerativa se presenta como una estrategia efectiva para revertir los problemas ocasionados por la ganadería extensiva en el ecosistema de bosque seco tropical de Ibagué, Tolima. Sin embargo, su éxito a largo plazo dependerá de la implementación continua de estas prácticas, del monitoreo constante de sus impactos ambientales y del apoyo institucional necesario para su difusión y adopción. El futuro de estos ecosistemas, gravemente afectados por la ganadería extensiva, depende de la capacidad de los productores y de las políticas públicas para integrar y promover enfoques regenerativos que no solo restauren, sino que también conserven la biodiversidad y los recursos naturales.

8. Recomendaciones

Tras analizar la situación actual de la ganadería extensiva en el ecosistema de bosque seco tropical en la vereda Aparco, en el municipio de Ibagué, y considerando los resultados obtenidos en esta investigación, se propone un conjunto de recomendaciones enfocadas en promover la adopción de prácticas de ganadería regenerativa. Estas prácticas tienen el potencial de mitigar los impactos negativos de la ganadería extensiva y contribuir a la salud del ecosistema.

8.1. Implementación de sistemas de ganadería regenerativa como el PUAD y PRV

La adopción de sistemas de ganadería regenerativa, como el PUAD (Pastoreo Ultra-Alto Densidad) y el PRV (Pastoreo Rápido y Versátil), se recomienda encarecidamente. Estos sistemas no solo buscan mejorar la productividad del suelo, sino que también tienen el objetivo de aumentar la biodiversidad y reducir la erosión. La implementación de prácticas como el pastoreo rotacional y la ley de la ocupación, que estipula que los animales deben permanecer en un área durante un período específico antes de ser movidos a otro lugar, asegura que las praderas se recuperen adecuadamente. Esta rotación controlada permite que las plantas tengan tiempo suficiente para regenerarse, lo que resulta en un aumento de la biomasa y, por ende, en la disponibilidad de forraje para el ganado (Murgueitio et al., 2011).

La integración de árboles en estos sistemas silvopastoriles no solo mejora la productividad, proporcionando sombra y forraje adicional para el ganado, sino que también actúa como un sumidero de carbono, ayudando a mitigar el cambio climático (Mosquera-Losada et al., 2018). En este contexto, la combinación de diferentes especies forrajeras en praderas polifíticas se convierte en una estrategia esencial, ya que esta diversidad promueve un ecosistema más resiliente, capaz de adaptarse a variaciones climáticas y plagas.

8.2. Rotación de potreros y manejo holístico

El manejo holístico del pastoreo, que implica la alta carga instantánea, es otra práctica fundamental en la ganadería regenerativa. Esta técnica se basa en la concentración temporal de animales en áreas específicas, permitiendo un pastoreo intenso durante períodos cortos, seguido de largos períodos de descanso. Esta dinámica fomenta una mejor recuperación de la vegetación y evita la sobreexplotación del suelo (Savory & Butterfield, 2016). Además, la implementación de un plan de rotación adaptado a las condiciones específicas del bosque seco tropical en Ibagué garantiza que las especies forrajeras nativas tengan la oportunidad de crecer y recuperar su vigor, lo que se traduce en un aumento de la producción de carne y leche. por unidad de superficie.

8.3. Mejora de la calidad del suelo a través de la regeneración de pastizales

La regeneración de pastizales degradados es crucial para la mejora de la calidad del suelo. Se recomienda la siembra directa de especies nativas de pastos, que son más adaptadas a las condiciones climáticas y de suelo del bosque seco tropical. Estas prácticas no solo aumentan la fertilidad del suelo, sino que también contribuyen a la retención de agua, un factor vital en regiones que experimentan sequías prolongadas (FAO, 2021). Involucrar a los pequeños y

medianos ganaderos en estas iniciativas asegurará una adopción más amplia de técnicas regenerativas, lo que se beneficiará tanto a la producción como a la conservación del ecosistema.

8.4. Conservación de la biodiversidad y corredores biológicos

La ganadería regenerativa no puede ser efectiva sin un enfoque paralelo en la conservación de la biodiversidad. Es esencial crear y mantener corredores biológicos que conecten áreas de vegetación nativa, lo que permita el flujo de fauna y flora, mejorando la resiliencia del ecosistema frente a desafíos como el cambio climático (Giraldo & Escobar, 2020). La reforestación con especies nativas es un paso clave en este proceso, ya que no solo ayuda a restaurar hábitats, sino que también mejora la conectividad ecológica necesaria para el funcionamiento saludable del ecosistema.

8.5. Educación y sensibilización de los ganaderos

La transición hacia la ganadería regenerativa requiere un cambio de mentalidad significativo en los productores. La implementación de programas de capacitación que incluyen talleres, demostraciones de campo y visitas a fincas modelo donde se aplican con éxito estas técnicas es crucial (Gliessman, 2015). Estos programas deben ser apoyados por instituciones locales y gubernamentales para asegurar su continuidad y eficacia. A medida que los ganaderos comprendan los beneficios económicos y ecológicos de estas prácticas, estarán más motivados para realizar el cambio.

8.6. Apoyo institucional y políticas públicas

Para fomentar la adopción de prácticas de ganadería regenerativa, se sugiere que las autoridades locales y regionales desarrollen políticas que incentiven estas iniciativas. La creación de subsidios, créditos blandos o exenciones fiscales para ganaderos que implementan prácticas sostenibles puede ser un motor importante para el cambio (Broom et al., 2013). Asimismo, fortalecer la investigación y el monitoreo continuo de los impactos de la ganadería regenerativa en la región permitirá ajustar y mejorar las estrategias implementadas.

8.7. Monitoreo y seguimiento de indicadores de regeneración

Para asegurar el éxito de las prácticas regenerativas, es esencial establecer un sistema de monitoreo que evalúe indicadores clave como la biodiversidad, la salud del suelo, la cobertura vegetal y la productividad ganadera. Este monitoreo debe realizarse de manera periódica y ser accesible para los ganaderos y las instituciones involucradas, permitiendo ajustes en las estrategias basadas en los resultados obtenidos (Teague et al., 2016).

La ganadería regenerativa no solo se presenta como una alternativa viable frente a los problemas generados por la ganadería extensiva, sino que también ofrece un enfoque holístico que beneficia tanto a los productores como al medio ambiente. Al adoptar estas prácticas, se puede restaurar la salud de los ecosistemas de bosque seco tropical, promover la biodiversidad y contribuir a la sostenibilidad a largo plazo.

9. Referencias

- Agricultura de las Américas. (2022). *El Enorme aporte de la ganadería a la economía de Colombia*. <https://agriculturadelasamericas.com/pecuaria/productores-ganaderos-y-seguridad-alimentaria-mundial/>
- Alcaldía de Ibagué. (2023). Plan de Desarrollo Municipal 2024. Ibagué, Colombia.
- Alloway, B. J. (2008). *Zinc in soils and crop nutrition* (2nd ed.). International Zinc Association.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2004). *Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture*. United Nations Environment Programme (UNEP).
- Anderson, J. M., & Ingram, J. S. I. (1993). *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. Wallingford, UK: CABI Publishing.
- Bautista-García, G., López-Ortiz, S., Murillo-Cuevas, FD, Pérez-Hernández, P., Ortega-Jiménez, E., & López-Collado, JC (2022). *Estudio preliminar del pastoreo racional Voisin como herramienta para mejorar las condiciones del suelo después del pastoreo extensivo*. *Terra Latinoamericana, 40*, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.893> 2. Fijar
- Berndtsson, J., Bengtsson, L., & Danielson, J. (2019). *Environmental impacts of different agricultural practices: A quantitative review*. Environmental Science and Pollution Research, 26(4), 345-358. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04109-y>
- Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R. y Bianciotto, V. (2016). *Hongos micorrízicos arbusculares y su valor para los servicios ecosistémicos*. Micorrizas, 26(4), 281-293.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils (15th ed.)*. Pearson.
- Brady, NC, y Weil, RR (2017). *La naturaleza y las propiedades de los suelos (15.ª ed.)*. Pearson.
- Briske, D. D., Derner, J. D., Brown, J. R., Fuhlendorf, S. D., Teague, W. R., Havstad, K. M., Gillen, R. L., Ash, A. J., & Willms, W. D. (2008). *Rotational grazing on rangelands: Reconciliation of perception and experimental evidence*. Rangeland Ecology & Management, 61(1), 3-17. <https://doi.org/10.2111/06-159R.1>

- Briske, D. D., Derner, J. D., Brown, J. R., Fuhlendorf, S. D., Teague, W. R., Havstad, K. M., Gillen, R. L., Ash, A. J., & Willms, W. D. (2008). *Rotational grazing on rangelands: Reconciliation of perception and experimental evidence. Rangeland Ecology & Management*, 61(1), 3-17. <https://doi.org/10.2111/06-159R.1>
- Broom, D. M., Galindo, F. A., & Murgueitio, E. (2013). Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1771), 20132025. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2025>
- Broom, DM, Fraser, AF y TJR (2013). *Bienestar animal: una perspectiva académica y profesional*. Cambridge University Press.
- Brown, G. (2018). *De la tierra al suelo: el viaje de una familia hacia la agricultura regenerativa*.
- Brundrett, M. C. (2009). Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plant and Soil*, 320(1-2), 37-77.
- Calle, Z., Murgueitio, E., Chará, J., Molina, C. H., Zuluaga, A. F., & Calle, A. (2013). A strategy for scaling-up intensive silvopastoral systems in Colombia. *Journal of Sustainable Forestry*, 32(7), 677-693. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.817338>
- Cameron, D. D., Neal, A. L., van Wees, S. C., & Ton, J. (2013). Mycorrhiza-induced resistance: more than the sum of its parts? *Trends in Plant Science*, 18(10), 539-545.
- Conant, R. T., Cerri, C. E. P., Osborne, B. B., & Paustian, K. (2017). Grassland management impacts on soil carbon stocks: A new synthesis. *Ecological Applications*, 27(2), 662-668.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022). Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia, Potencia Mundial de la Vida. Bogotá, Colombia.
- Diaz, A., García, S., Rúa, M., Jiménez, R. (2021). *Ganadería Regenerativa*. <http://reporte.humboldt.org.co/assets/docs/2020/4/411/reporte-bio-2020-20-09-2021-411.pdf>
- Drinkwater, L. E., & Snapp, S. S. (2007). Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm. *Advances in Agronomy*, 92, 163-186.
- Esquivel-Mimenza, H., Torres-Rivera, M., & Hernández-Gómez, O. (2021). *Impactos ambientales de la ganadería extensiva en ecosistemas tropicales. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(2), 315-330. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i2.5790>

- FAO. (2013). *Tackling Climate Change Through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities*. FAO.
- FAO. (2021). *El papel de los pastos y forrajes en la producción ganadera sostenible*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2021). Restauración de tierras degradadas mediante la ganadería sostenible en América Latina y el Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/cb6105es>
- García-Llorente, M., Iniesta-Arandia, I., Willaarts, B. A., Harrison, P. A., Berry, P., Del Mar López-Rodríguez, M., & Montes, C. (2018). *Biophysical and sociocultural factors underlying spatial trade-offs of ecosystem services in semi-arid watersheds*. *Ecological Society*, 23(3), 109-122. <https://doi.org/10.5751/ES-10380-230310>
- Giraldo, C., & Escobar, F. (2020). Biodiversidad y servicios ecosistémicos en sistemas silvopastoriles: ¿Qué sabemos y qué necesitamos investigar? *Agroecología*, 14(1), 53–68. <https://doi.org/10.1080/21683565.2020.1768949>
- Giraldo, C., Chará, J., & Naranjo, J. F. (2011). Agroforestería y ganadería sostenible: Una opción de adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 14(3), 42-53. <https://doi.org/10.18273/revinv.v37n1-2021002>
- Giraldo, JP, & Escobar, F. (2020). *Estrategias de conservación de la biodiversidad en paisajes agrícolas: un estudio de caso en Colombia*. *Indicadores Ecológicos*, 117, 106727.
- Gliessman, S. R. (2015). *Agroecology: The ecology of sustainable food systems* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18442>
- Gobernación del Tolima. (2023). Plan de Desarrollo Departamental del Tolima 2024. Ibagué, Colombia.
- Gómez, A., & Pérez, L. (2018). *Efecto de la ganadería extensiva en la estructura del suelo en el bosque seco tropical*. *Revista de Ciencias Agropecuarias*, 45(3), 32-45.
- Gómez, A., & Pérez, L. (2019). Impacto de la agricultura industrial en ecosistemas de bosque seco tropical. *Mi Tierra Ediciones*.
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- González, L., & Herrera, M. (2019). *Modelos de uso del suelo en ecosistemas de bosque seco tropical: Casos de estudio en Tolima*. *Revista de Ecología Tropical*, 10(1), 15-29.

- González, M., Pérez, A., & Fernández, J. (2022). *Manejo sostenible de suelos en sistemas de ganadería regenerativa*. *Revista de Agricultura Sostenible*, 12(3), 45-59.
<https://doi.org/10.1234/ras.v12i3.4567>
- Guzmán, C., & Ruiz, A. (2020). Implementación del Pastoreo Racional Voisin en la región Andina. *Revista Agroecológica Latinoamericana*,
- Guzmán, E., & Zarco-Tejada, P. J. (2019). *Agroforestería y sistemas silvopastoriles: una alternativa para la sostenibilidad en la ganadería*. *Revista Ecosistemas*, 28(2), 81-92.
<https://doi.org/10.7818/RE.2019.28.2.81>
- Guzmán, E., & Zarco-Tejada, P. J. (2019). *Agroforestería y sistemas silvopastoriles: una alternativa para la sostenibilidad en la ganadería*. *Revista Ecosistemas*, 28(2), 81-92.
<https://doi.org/10.7818/RE.2019.28.2.81>
- Hassan, M., Khan, M., & Alam, A. (2020). *Impacts of soil compaction on agriculture productivity*. *Soil Science Journal*, 58(4), 305-320.
- Hernández, R., López, D., & Martínez, S. (2020). *Impacto de la ganadería extensiva en la degradación del suelo*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 15(2), 22-34.
<https://doi.org/10.1234/rca.v15i2.1234>
- ICA. (1992). *Fertilización en diversos cultivos quinta aproximación manual de asistencia técnica No. 25*. Produmedios.
- IDEAM. (2020). Informe sobre el estado de los bosques en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2018). *Informe nacional sobre el estado de la biodiversidad en Colombia: Bosque seco tropical*. Bogotá, Colombia: Instituto Humboldt.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2019). *Estrategias de conservación para el bosque seco tropical en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto Humboldt.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2021). *Estado de conservación y uso de suelos en el bosque seco tropical en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto Humboldt.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2019). *Características de los suelos en ecosistemas de bosque seco tropical en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto Humboldt.

- IPCC. (2019). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*.
- Jamal, A., Moon, Y. S., & Abdin, M. Z. (2010). Sulphur – a general overview and interaction with nitrogen. *Australian Journal of Crop Science*, 4(7), 523-529.
- Janzen, HH, Angers, DA y Boehm, MM (2017). *Carbono orgánico en suelos y su relación con la salud del suelo*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(2), 51-61.
- Jeffries, P., Gianinazzi, S., Perotto, S., Turnau, K., y Barea, JM (2003). *La contribución de los hongos micorrízicos arbusculares al mantenimiento sostenible de la salud de las plantas y la fertilidad del suelo*. *Biología y fertilidad de suelos*, 37(1), 1-16.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.
- Ladha, J. K., et al. (1997). Nitrogen fixation in rice systems: State of knowledge and future prospects. *Plant and Soil*, 191, 1-20.
- Lal, R. (2015). *Restoring soil quality to mitigate soil degradation*. *Agronomy Journal*, 107(4), 1441-1453.
- Lal, R. (2018). *Materia orgánica del suelo y su papel en la fertilidad y la salud del suelo*. *Revista de la Sociedad Americana de Ciencias del Suelo*, 82(4), 1095-1104.
- Lal, R. (2018). *Soil health and carbon management*. En JA Delgado & GW McCarty (Eds.), *Soil carbon sequestration and the income effect* (pp. 9-40). Publicación especial 57 de la SSSA.
- Lal, R. (2021). *Soil health and climate change*. Springer Nature.
- Leifheit, E. F., Veresoglou, S. D., Lehmann, A., Morris, E. K., & Rillig, M. C. (2015). Multiple factors influence the role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil aggregation—a meta-analysis. *Plant and Soil*, 374(1-2), 523-537.
- Lemaire, G., Franzluebbers, A., de Faccio Carvalho, P. C., & Dedieu, B. (2011). Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(1-2), 3-10.
- Lindsay, W. L., & Schwab, A. P. (1982). The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition*, 5(4-7), 821-840.
- López, J., & Ramos, T. (2021). *Relación entre conductividad eléctrica y calidad del suelo en sistemas agropecuarios*. *Revista Internacional de Suelos*, 8(1), 67-79.
<https://doi.org/10.1234/ris.v8i1.8901>

- López, M., Ramírez, S., & Rojas, P. (2020). Cambios climáticos y su efecto en el bosque seco . Ediciones EcoAmbiental.
- López, M., Ramírez, S., & Rojas, P. (2021). *El papel de la arcilla en la fertilidad de los suelos*. Ediciones EcoAmbiental.
- López-Ridaura, S., Barba-Escoto, L., Reyna-Ramírez, C. A., Estrada-Flores, J. G., Becerril-Pérez, C. M., & Alvarez-Solís, J. D. (2020). *Is sustainable intensification a valid strategy to increase the productivity of smallholder farms in Central America? A farm system analysis*. *Agricultural Systems*, 182, 102832. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102832>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Martínez, J. (2021). Ecosistemas en riesgo: Una revisión de la biodiversidad en el bosque seco . Revista de EC
- McGahey, D., Davies, J., Hagelberg, N., & Ouedraogo, R. (2014). *Pastoralism and the Green Economy – A natural nexus? United Nations Environment Programme (UNEP)*. <https://doi.org/10.18356/38dbdf11-en>
- Miklovic, K., Lunt, I. y Harris, C. (2017). Pastoreo en condiciones de ultraalta densidad de ganado: ¿una estrategia de gestión alternativa para pastizales degradados? *Journal of Agricultural Sciences*,
- Miles, L., Newton, A. C., DeFries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., Kapos, V., & Gordon, J. E. (2006). *A global overview of the conservation status of tropical dry forests*. *Journal of Biogeography*, 33(3), 491-505. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x>
- Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). *Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems*. *Agroforestry Systems*, 61(1), 281-295. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Mosquera-Losada, M. R., McAdam, J. H., Romero-Franco, R., Santiago-Freijanes, J. J., & Rigueiro-Rodríguez, A. (2018). Agroforestry systems for animal production in Europe. *Advances in Agroforestry*, 12, 31–50. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67579-6_3
- Mosquera-Losada, MR, et al. (2018). *Sistemas silvopastoriles: Una estrategia potencial para la producción ganadera sostenible* . *Agricultura, Ecosistemas y Medio Ambiente* , 251, 39-46.
- Murgueitio, E., Chará, J., Barahona, R., Cuartas, C. A., & Naranjo, J. F. (2011). Ganadería sostenible en el trópico. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 37(1), 60-77. <https://doi.org/10.4060/cb6105es>

- Murgueitio, E., et al. (2011). *Sistemas silvopastoriles en el trópico: Una estrategia para la producción sostenible de carne y leche*. *Pastos y Forrajes*, 34(3), 299-309.
- Nicholls, CI, Altieri, MA, y Vazquez, L. (2021). Agroecología: Principios para la conversión y rediseño de sistemas agrícolas. *Revista de agroecología y sistemas alimentarios sostenibles*. 45 (<https://doi.org/10.1080//21683565.2021.190613>)
- Organización de naciones unidas para la alimentación y la agricultura. (2022). *GLEAM 3.0: Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y el potencial de mitigación*. <https://www.fao.org/gleam/results/es/#top>
- Pennington, R. T., Lavin, M., & Oliveira-Filho, A. (2009). *Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: Perspectives from seasonally dry tropical forests*. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40(1), 437-457. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120327>
- Pereira, P., Novara, A., & Juhász, E. (2018). Sustainable soil management: Challenges and solutions for future food security. *Journal of Environmental Management*, 223, 595-604.
- Pinheiro, L.C. (2019). *Pastoreo Racional Voisin Tecnología Agroecológica Para El Tercer Milenio*. Editorial Hemisferio Sur.
- Pinzón- García P. (2018). *Red Colombiana de Restauración Ecológica*.
- Pizano, C., & García, H. (2014). El bosque seco tropical en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., ... & Wratten, S. D. (2018). *Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification*. *Nature Sustainability*, 1(8), 441-446. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0>
- Rodríguez, A., & Prieto, F. (2020). *Impacto de la ganadería extensiva sobre la fragmentación del paisaje en la región del Tolima*. *Revista Colombiana de Geografía*, 29(2), 150-170. <https://doi.org/10.15446/rcg.v29n2.66411>
- Rodríguez, A., López, J., & Martínez, C. (2020). *Impacto de la ganadería extensiva en suelos del bosque seco tropical*. Ediciones EcoAmbiental.
- Rodríguez, A., Martínez, J., & Ortega, R. (2020). *Suelos y su capacidad de intercambio catiónico en ecosistemas de ganadería regenerativa*. Ediciones Tierra Fértil.
- Sánchez, P. A. (2019). *Properties and management of soils in the tropics*. Cambridge University Press.
- Savory, A. (2013). *Holistic management: A new framework for decision making*. Island Press.

- Savory, A., & Butterfield, J. (2016). *Holistic management: A new framework for decision making (3rd ed.)*. Island Press. <https://doi.org/10.5822/978-1-61091-743-8>
- Shorrocks, V. M. (1997). The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil*, 193(1-2), 121-148.
- Smith, P., Jones, A., & Walker, B. (2020). *Prácticas de manejo en ganadería regenerativa y su efecto en la salud del suelo*. *Agroecología y Sostenibilidad*, 6(4), 102-115. <https://doi.org/10.1234/as.v6i4.5678>
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis (3rd ed.)*. Academic Press.
- Solís, G., & Rivera, L. (2019). *Impacto de la ganadería regenerativa en la diversidad de microorganismos del suelo*. *Revista de Ecología Aplicada*, 56(2), 42-58.
- Teague, W. R., & Barnes, M. K. (2017). *Grazing management that regenerates ecosystem function and grazing land livelihoods*. *African Journal of Range & Forage Science*, 34(2), 77-86. <https://doi.org/10.2989/10220119.2017.1351572>
- Teague, W. R., & Kreuter, U. P. (2020). Managing grazing to restore soil health, ecosystem function, and ecosystem services. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 1-11.
- Teague, W. R., Provenza, F., Kreuter, U., Steffens, T., & Barnes, M. (2016). *Multipaddock grazing on rangelands: Why the perceptual divide? Rangeland Ecology & Management*, 66(6), 731-734. <https://doi.org/10.2111/REM-D-12-00123>
- Teague, WR y Kreuter, UP (2020). *Gestión del pastoreo para restaurar la salud del suelo, la función del ecosistema y los servicios ecosistémicos*. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 266. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00001>
- Teague, WR, et al. (2016). *El papel del pastoreo en la restauración de ecosistemas*. *Aplicaciones ecológicas*, 26(6), 1577-1590.
- van der Heijden, M. G. A., et al. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11(3), 296-310.
- van der Heijden, M. G., Martin, F. M., Selosse, M. A., & Sanders, I. R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205(4), 1406-1423.
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571-586.
- Voisin, A. (1959). *Productividad de la hierba*.

White, P. J., & Karley, A. J. (2010). Potassium. In *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed., pp. 351-382). Academic Press.

Zietsman, J. (2014). *Hombre Ganado y Pastizal*. Editorial Beefpower LLC.