

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

UNIDAD SALTILLO

**SUSTENTABILIDAD DE LOS RECURSOS NATURALES Y
ENERGÍA**

**“Evaluación del manejo sostenible del suelo en pastizales
ganaderos en zonas áridas como indicador de su re-
carbonización”**

T E S I S

Que presenta

Karla Liliana López García

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS

EN

**SUSTENTABILIDAD DE LOS RECURSOS NATURALES Y
ENERGÍA**

Directora de la Tesis:

Dra. Dulce Yaahid Flores Rentería

Ramos Arizpe, Coahuila

ENERO, 2023

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca otorgada para la realización de mi proyecto de tesis.

Al CINVESTAV Saltillo y al personal por el apoyo para la realización del trabajo de tesis.

A la Dra. Dulce Yaahid Flores Rentería por su liderazgo durante todo el trayecto y brindar siempre su conocimiento, apoyo, guía, paciencia, así como herramientas para mi desarrollo personal y profesional, mil gracias por la confianza.

Al Sr. Luis Robles, por permitirnos estudiar y compartir los conocimientos del gran trabajo que realiza diariamente en el rancho Los Robles.

Al Sr. Octavio Bermúdez, por permitirnos realizar el estudio de tesis en el rancho Valle Colombia y compartir los resultados de su arduo trabajo.

Al Ing. Francisco Torralba y el Ing. Ángel González Arias, por su apoyo para la realización de este trabajo, su espíritu de aventura fue fundamental para la realización de este proyecto

A mis compañeros de laboratorio y amigos, Gabriela Guillen por su entusiasmo y sus enseñanzas, a René Juárez por el soporte y complicidad durante todo el trayecto.

A mis padres y hermanos por el apoyo y ánimos incondicionalmente, sin ustedes nada de esto sería posible, gracias por siempre darme un rayito de luz.

A Dios, sé que siempre estuviste aquí.

DEDICATORIA

A Sara, Joel, Jorge y Axel.

CONTENIDO

I. Resumen.....	8
II. Abstract.....	9
1. Introducción.....	10
2. Antecedentes.....	12
2.1. Suelos y sus servicios ecosistemicos.....	12
2.2. Reciclado del carbono orgánico del suelo.....	12
2.3. Actividad biológica del suelo.....	15
2.4. Pastizales utilizados para la ganadería.....	16
2.5. Manejo sostenible del suelo.....	21
1. Justificación.....	23
2. Hipotesis.....	23
3. Objetivos.....	24
5.1. Objetivo General.....	24
5.2. Objetivos particulares.....	24
4. Metodología Científica.....	25
6.1. Selección de áreas de muestreo.....	25
6.2. Diseño de muestreo.....	27
6.3. Muestreo.....	28
6.4. Medición de indicadores.....	30
6.5. Análisis y evaluación.....	34
6.5.1. Productividad de los pastizales ganaderos.....	34
6.5.2. Determinación de la densidad aparente.....	34
6.5.3. Determinación de la MOS.....	34
6.5.4. Determinación del C en la biomasa microbiana.....	35
6.5.5. Determinación del cociente metabólico.....	36
6.5.6. Tasa de secuestro de COS en pastizales ganaderos.....	36
5. Resultados y discusión.....	38
7.1. Características generales de las áreas de estudio.....	38
7.1.1. Rancho Valle Colombia.....	38

7.1.2. Rancho Los Robles	40
7.2. índice de vegetación mejorado de las parcelas muestreadas	43
7.3. Caracterización físico-química del suelo de pastizales ganaderos	45
7.4. Productividad de los pastizales ganaderos	48
7.5. Efecto del tipo de manejo de pastoreo de ganado en la actividad microbiana	49
7.6. Tasa de secuestro de COS en pastizales ganaderos	53
7.7. Factores que afectan la actividad biológica de los suelos en pastizales ganaderos. ..	55
7.8. Factores que afectan la cantidad de COS en suelos de pastizales ganaderos	58
6. Conclusiones	60
7. Bibliografía	61

Índice de símbolos y abreviaturas

ANOVA	Análisis de varianza
C	Carbono
CE	Conductividad eléctrica
CHCl ₃	Cloroformo
CIS	Carbono Inorgánico del Suelo
CO ₂	Dióxido de carbono
COS	Carbono Orgánico del Suelo
CT	Carbono Total
DA	Densidad aparente
ECSS	Espesor de la Capa Superior del Suelo
EVI	Índice de Vegetación Modificado
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
GEI	Gases de Efecto Invernadero
Hr	Humedad relativa
Hs	Humedad del suelo
IR	Infrarrojo
K ₂ SO ₄	Sulfato potásico
MOS	Materia Orgánica del Suelo
MS	Masa del Suelo en 10 cm
NIR	Radiación del infrarrojo cercano
PAR	Radiación Fotosintéticamente Activa
Rs	Respiración del suelo
Ta	Temperatura ambiental
Ts	Temperatura del suelo

Glosario de términos

Agregados de suelo: resultado de la unión de los minerales del suelo (limo, arcilla, arena), como grupos de partículas que forman parte de la estructura del suelo.

Calciol: tipo de suelo que se caracteriza por la acumulación de carbonatos secundarios.

Carga animal: cantidad de ganado que pasta en un área y tiempo determinado.

Cobertura vegetal basal: capa de vegetación a nivel del suelo.

Durisol: tipo de suelo que contiene sílice secundaria cementada en el primer metro del suelo.

Ganado: animales domesticados criados con fines agrícolas, utilizados para producir alimentos, fibra y trabajo.

Ijar: parte ubicada al final de la última costilla del lado izquierdo del bovino, utilizado como parámetro por los ganaderos para saber si la vaca está llena o necesita alimento, si se observa un hueco en el ijar le hace falta alimento al ganado, por el contrario, si se observa una superficie uniforme en la parte del ijar se considera que la vaca está llena.

Hato: conjunto de vacas

Leptosol: suelos con escasa profundidad, considerados como jóvenes y pedregosos.

Palatable: alimento que agrada más al paladar del animal

Parches basales y aéreos: espacios de suelo desnudo sin vegetación, en la capa superior del suelo para los basales y en las copas de los árboles vía aérea.

Pastoreo de ganado: aprovechamiento de la vegetación para la alimentación del ganado.

Pastoreo rotativo adaptativo: planificación de la alimentación del ganado, rotándolo por áreas y tiempo definidos dejando largos periodos de descanso.

Potrero: subdivisión del área de pastizales utilizada como alimento del ganado para un mayor aprovechamiento de la vegetación presente en un área determinada.

Resiliencia del sistema: capacidad de los sistemas naturales de afrontar y responder a perturbaciones o fenómenos adversos para conservar o recuperar su funcionalidad, estructura e identidad. Además de mantener su capacidad de adaptación y transformación.

Rumen: Parte del estómago de la vaca, se encarga de la fermentación microbiana anaeróbica y la digestión de materiales no digeridos.

Sumidero: depósito que almacena carbono atmosférico por medio de diferentes procesos puede encontrarse de forma natural en océanos y en ecosistemas terrestres. Un ecosistema que actúa como sumidero, es aquel que tiene la capacidad de fijar más carbono del que libera.

Resumen

El suelo tiene la capacidad de almacenar carbono (C), como resultado se obtienen múltiples beneficios asociados al ecosistema y a la población. Sin embargo, los diferentes manejos productivos, como la agricultura o la ganadería modifican la capacidad de almacenar el C en el suelo. La ganadería convencional y el uso de pastizales ha causado la degradación de los suelos en el país; sin embargo, en la actualidad se aplican manejos alternativos que han mostrado buenos resultados en la conservación de los suelos, lo cual ha sido evaluado con parámetros armonizados con la capacidad de evaluar si las prácticas de manejo productivo aplicadas pueden ser consideradas sostenibles, en cuya evaluación el C orgánico del suelo es muy relevante. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de los manejos alternativos aplicados a los pastizales ganaderos del desierto Chihuahuense en los indicadores del suelo, y en el almacenamiento de C en el suelo comparados con suelos de manejo convencional. Para lograr el objetivo, se seleccionaron dos tipos de manejo alternativo y cada uno fue comparado con un área de manejo convencional. El primero fue el manejo holístico, que fue comparado con un área de manejo convencional con alto tránsito de animales dentro del mismo rancho de estudio. El segundo manejo seleccionado fue el manejo regenerativo y se comparó con un sitio adyacente con manejo convencional. Se determinaron algunos parámetros en ambos sitios como indicadores del manejo sostenible bajo los lineamientos del protocolo para la evaluación de la gestión sostenible del suelo. De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio, los indicadores de productividad primaria, el contenido de carbono del suelo y la actividad biológica (biomasa microbiana y respiración del suelo) fue mayor en pastizales con manejo regenerativo y holístico, en comparación con el manejo convencional extensivo. Además, los suelos de pastizales ganaderos con manejo holístico presentaron una tasa de almacenamiento de $0.02 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; mientras que la tasa de almacenamiento del manejo regenerativo fue de $2.4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), si los indicadores del suelo se mantienen o aumentan en comparación con su control de manejo convencional, se puede considerar que los manejos aplicados benefician la re-carbonización de los suelos, por lo que pueden ser consideradas de manejo sostenible al suelo. Además, el almacenamiento de C fue modificado con el manejo convencional, la respiración del suelo no se correlaciona con ninguno factor y los suelos con este manejo son más compactos en comparación con los manejos alternativos.

Abstract

Soils has the capacity to store carbon (C), as a result, multiple benefits associated with the ecosystem and the population are obtained. However, the different productive managements, such as agriculture or livestock, modify the capacity to store C in the soil. Conventional livestock farming and the use of pastures have caused soil degradation in the country; however, currently alternative managements are applied that have shown good results in soil conservation, which has been evaluated with harmonized parameters with the ability to assess whether the productive management practices applied can be considered sustainable, in whose evaluation soil organic C is very relevant. The objective of the study was to evaluate the effect of alternative management applied to cattle pastures in the Chihuahuan desert on soil indicators, and on soil C storage compared to conventionally managed soils. To achieve the objective, two types of alternative management were selected and each one was compared with a conventional management area. The first was holistic management, which was compared with a conventional management area with high animal traffic within the same study ranch. The second selected management was regenerative management and was compared with an adjacent site with conventional management. Some parameters were determined in both sites as indicators of sustainable management under the guidelines of the protocol for the evaluation of sustainable soil management. According to the results obtained in the study, the indicators of primary productivity, soil carbon content and biological activity (microbial biomass and soil respiration) were higher in pastures with regenerative and holistic management, compared to conventional management. extensive. In addition, the soils of cattle pastures with holistic management presented a storage rate of $0.02 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$; while the storage rate of regenerative management was $2.4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), if the soil indicators are maintained or increase in comparison with their conventional management control, it can be considered that the applied managements benefit the re-carbonization of soils, so they can be considered as sustainable soil management. In addition, C storage was modified with conventional management because soil respiration is not correlated with any factor and soils with this management are more compact compared to alternative management.

1. Introducción

El suelo ha sido definido como un sistema abierto y complejo que cumple múltiples servicios ecosistémicos, los cuales pueden agruparse en cuatro categorías: servicios de aprovisionamiento, servicios de regulación, servicios culturales y servicios de apoyo. Dentro de los servicios de regulación el suelo almacena carbono (C). El C total del suelo se divide en carbono orgánico (COS) y carbono inorgánico (CIS), siendo el COS el principal indicador del estado de salud del suelo [1]. Por otro lado, el flujo de salida de C del suelo es en forma de CO₂ (dióxido de carbono) y es conocido como respiración del suelo (Rs) [2]. La permanencia del COS se ha visto afectada por actividades antropogénicas, especialmente las que modifican el uso de suelo y su cobertura. Como consecuencia de la pérdida del COS, los servicios ecosistémicos se han reducido severamente en el planeta, por lo que se deben adoptar prácticas de manejo sostenible que mantengan el COS [3].

Dentro de las actividades del uso de suelo se encuentra la ganadería, ésta es una actividad del sector primario que consiste en la cría, tratamiento y reproducción de animales domésticos con fines de producción para el consumo humano; puede ser extensiva, intensiva y de autoconsumo [4]. La ganadería es una de las principales actividades económicas, en la que históricamente se han utilizado prácticas de manejo convencional que provocan el sobrepastoreo y la degradación del suelo [5], por lo que en los años recientes, se ha buscado la implementación de buenas prácticas de pastoreo de ganado [6]. Estas prácticas alternativas al manejo convencional, buscan la permanencia de la productividad a largo plazo, a través de un manejo planificado que permita la resiliencia del sistema [7]. Dentro de las prácticas de manejo alternativo, destaca la adopción de prácticas de manejo holístico y de manejo regenerativo, las cuales han sido aplicadas en el desierto Chihuahuense y han mostrado buenos resultados en la productividad del ganado, sin embargo es necesaria su evaluación [8].

Recientemente, la FAO marcó las pautas para la evaluación del manejo sostenible del suelo en las prácticas productivas. Esta evaluación se basa en la cuantificación del COS aunado a la determinación de la productividad de la vegetación, la actividad biológica (respiración del suelo y biomasa microbiana) y la densidad aparente del suelo [9]. La permanencia o liberación del C en el suelo es fuertemente controlada por la actividad biológica del suelo, la cual a su vez depende en gran medida del tipo e intensidad de manejo que tengan los sistemas [10]. Por lo que conocer los factores bióticos y abióticos que influyen en la liberación del C en los pastizales ganaderos

contribuirá al entendimiento de los mecanismos de almacenamiento de C en el suelo en estos sistemas productivos.

Así, en este estudio se evalúa el efecto de las prácticas de manejo alternativas en los indicadores del suelo, y en el almacenamiento de C en el suelo, de tal manera que se pueda determinar su sostenibilidad en los pastizales ganaderos de las zonas áridas del desierto Chihuahuense. Para ello, se considerarán como indicadores de sostenibilidad la productividad del suelo, la densidad aparente, el COS, la respiración del suelo y la biomasa microbiana presente en el suelo.

2. Antecedentes

2.1. Suelos y sus servicios ecosistémicos

El suelo es un compartimiento ecosistémico dinámico, el cual está compuesto por minerales (arcilla, limo y arena), materia orgánica, organismos vivos, aire y agua [11]. Las características inherentes del suelo dependen de distintos factores formadores como la roca madre, el clima, la topografía y el tiempo de desarrollo, a lo que se le denomina pedogénesis, pero también de factores antropogénicos que modifican el componente biológico (cobertura de vegetación, animales, microorganismos), físico (encostramiento, sellado, arado, erosión) y químico (deposición de sales, contaminación)[12].

La salud y fertilidad del suelo puede ser evaluada de acuerdo con sus propiedades físicas (textura, estructura, porosidad y almacenamiento de agua), químicas (pH, carbono, capacidad de intercambio y almacenamiento de nutrientes) y biológicas (diversidad, actividad y funcionalidad de microorganismos) [13]. El suelo provee una serie de servicios ecosistémicos los cuales se dividen en *servicios de aprovisionamiento*: obtención de materias primas, alimentos, madera, combustible, fibras y retención de agua; *servicios de regulación*: regulación climática, regulación del agua, control de erosión e inundaciones, polinización, regulación de plagas, almacenamiento de C y purificación de agua; *servicios culturales*: recreación, ecoturismos, sentido del lugar y reconocimiento; *servicios de apoyo*: meteorización, formación del suelo, ciclo de nutrientes y provisión de hábitat para las especies. Sin embargo, la capacidad del suelo de brindar servicios ecosistémicos dependerá del uso y manejo del suelo [14].

2.2. Reciclado del carbono orgánico del suelo.

Dentro de los servicios de regulación, el suelo funciona como un sumidero de C. En este sentido, el suelo es la mayor reserva de C terrestre, almacenando aproximadamente 2,500 GT (giga toneladas) de carbono en sus distintas fracciones (1,500 GT como COS y 950 GT como CIS), mientras que el C de la atmósfera es de 960 GT [15].

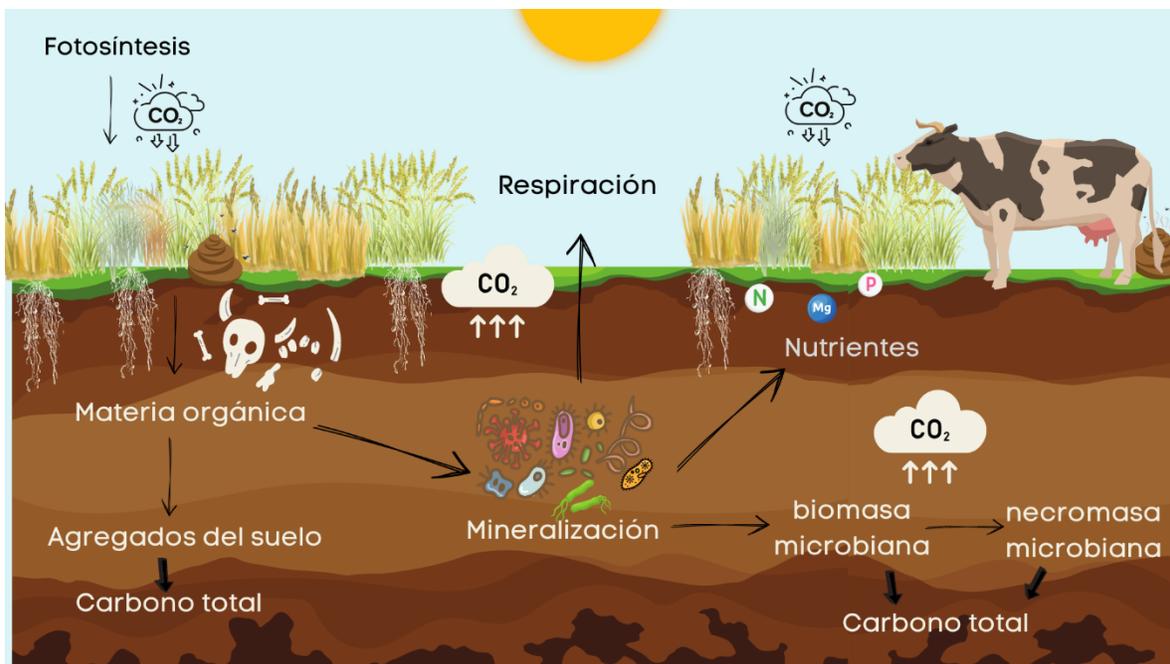


Figura 1. Intercambio de C entre la biósfera, atmósfera y pedosfera.

El ciclo biogeoquímico del C terrestre es el intercambio de C entre el suelo y la atmósfera (Fig. 1), el cual inicia con la captura de CO_2 atmosférico por medio de la fotosíntesis en las plantas, durante este proceso el CO_2 es asimilado y se fija en la biomasa vegetal como compuestos poliméricos de C (carbohidratos como celulosa, lignina o hemicelulosa) [16]. Una vez que la vegetación se seca y los tejidos caen a los suelos, se le denomina hojarasca, la cual se incorpora al suelo junto con las raíces y sus exudados, animales y microorganismos en diferente estado de descomposición. A la mezcla de residuos de microorganismos, vegetales y animales que se incorpora al suelo en semanas o meses dependiendo de su composición, se le denomina materia orgánica del suelo (MOS) [17].

Los microorganismos del suelo utilizan la MOS como sustrato para obtener energía, como resultado la MOS se descompone o mineraliza [18]. La MOS se fracciona en materia orgánica asociada a minerales (MOAM), que consiste en fragmentos microscópicos de material orgánico (necromasa y material vegetal) asociados a los minerales del suelo. La otra fracción es la materia orgánica particulada (MOP), la cual suele contener materia orgánica sin descomponer y compuestos lábiles derivados de plantas con estructuras más complejas, la MOP se descompone con mayor rapidez que la MOAM [18, 19].

La descomposición de la MOS inicia con la despolimerización, donde los microorganismos secretan enzimas para despolimerizar los componentes orgánicos contenidos en la MOS. Una parte del C de la MOS, se utiliza para aumentar la biomasa microbiana, otra se asocia a los minerales del suelo y el resto es liberado como CO₂ y nutrientes minerales disponibles para las plantas [16, 19]. El C recién agregado puede estabilizarse, impidiendo su transformación por microorganismos, mediante procesos físicos (protegidos por micro y macro agregados; siendo adsorbido por arcillas), y bioquímicos (transformando el C a estructuras más complejas). De esta forma el C puede permanecer en el suelo a través del tiempo y es almacenado como COS [17].

El COS es una mezcla heterogénea de materiales orgánicos; carbohidratos, azúcares simples, compuestos orgánicos complejos, cuya permanencia y estabilidad depende de factores bióticos y abióticos, así como de las condiciones de manejo y uso de suelo [20]. El COS puede ser clasificado de acuerdo con su estabilidad física y química, como [17]:

- Reserva rápida (reserva lábil): ingreso de carbono orgánico fresco, con una gran pérdida de biomasa inicial por su descomposición en los primeros años (1-2 años). Influye en el secuestro de C y la salud del suelo. Se encuentra en la capa superior del suelo y es un indicador de las propiedades físicas y químicas del suelo.
- Reserva intermedia: el COS fue transformado por los microorganismos del suelo a formas parcialmente más estables, se encuentra adherido a minerales y/o protegidos por los agregados del suelo. Su tiempo de rotación es de 10-100 años.
- Reserva lenta: Es la forma más estable del COS, su tiempo de rotación es de 10 hasta más de 1000 años. Además, contribuye con la capacidad de retención de nutrientes del suelo y se encuentra en los horizontes más profundos.

Es importante resaltar que el COS influye en la estructura del suelo, la retención y uso de agua, la retención de nutrientes, la actividad microbiana y en la capacidad de almacenamiento de C, por lo tanto, el COS refleja la funcionalidad de suelo y puede ser utilizado como indicador de la salud del suelo [21].

Por otro lado, al flujo de salida de C del suelo hacia la atmósfera se denomina respiración del suelo. Se compone de la respiración autótrofa, resultado del metabolismo de las raíces de las plantas y los microorganismos asociados a la rizósfera (superficie de las raíces) y la respiración heterótrofa (producto del metabolismo de los microorganismos durante la descomposición de los compuestos

orgánicos). La respiración del suelo contribuye en un 10% de CO₂ de las emisiones anuales globales, por lo que un pequeño cambio en los flujos de salida de CO₂ del suelo puede tener un efecto en su concentración atmosférica [10]. Existen otros procesos físicos y químicos que resultan en pérdida de C, como la erosión, la disolución de carbonatos y la transformación a carbono orgánico disuelto, el cual es lixiviado hacia los océanos y ríos [17, 22].

La cantidad del C en el suelo varía temporal y espacialmente, dependiendo de las entradas y salidas, y conforme a las características climáticas y estacionales; esta variación también se ve afectada por el uso y las prácticas de manejo del suelo [3]. Como consecuencia de las actividades antropogénicas, una mayor cantidad de C del suelo es liberado en comparación al que es capturado y almacenado, lo cual resulta en la degradación del suelo, disminuyendo así su capacidad de brindar servicios ecosistémicos [23]. Por ejemplo, el pastoreo de ganado extensivo resulta en pérdida de la cobertura vegetal, con una menor o nula aportación de MOS, ya que la biomasa vegetal aérea es totalmente consumida por el ganado, además, el constante pisoteo del ganado provoca la compactación del suelo; en conjunto, la baja cantidad de MOS y la compactación desencadenan un proceso de erosión, impidiendo el crecimiento de renuevos y la captación y mantenimiento de la humedad del suelo [1, 24, 25].

Estos beneficios de la presencia del COS se traducen en una mayor productividad vegetal, tanto de los ecosistemas naturales como de los sistemas agropecuarios. Así, las prácticas que favorecen la re-carbonización del suelo promueven una mayor seguridad alimentaria, al proveer más nutrientes a los cultivos, además de contribuir a la mitigación del cambio climático, al capturar CO₂ atmosférico, principal gas del efecto invernadero. En este sentido, las reservas de C en el suelo están lejos de estar saturadas por lo que existe un gran potencial para el almacenamiento de C y así contribuir a la mitigación del cambio climático [3, 17].

2.3. Actividad biológica del suelo

La comunidad microbiana del suelo y su actividad tienen un papel importante en la regulación y reservas del ciclo de C, ya que los microorganismos utilizan el C de la MOS como sustrato, retienen parte del C como biomasa y liberan el resto como CO₂ por oxidación de los compuestos orgánicos. Además, los microorganismos desempeñan funciones importantes como el ciclado de nutrientes, promueven el crecimiento de las plantas, el control de plagas, la mineralización de la materia orgánica y fijan nitrógeno, entre otras [26].

Para la producción de su biomasa, los microorganismos utilizan compuestos como ácidos nucleicos, lípidos, proteínas y carbohidratos de la biomasa vegetal [27]. La actividad de los microorganismos influye en el ciclo de C ya que son consumidores del COS y lo liberan C como resultado de su metabolismo; además contribuye con la biomasa en el suelo una vez que los microorganismos mueren [28]. La actividad biológica del suelo es fuertemente regulada por la temperatura y la humedad del suelo, así como la cantidad y calidad del C disponible, y su regulación está influida por el factor más limitante [29].

El cociente metabólico refleja la cantidad de energía que requieren los microorganismos para el uso de C. Por lo que se considera una medida de la eficiencia del uso de C por los microorganismos. Un mayor cociente metabólico implica que los microorganismos requieren una mayor energía para transformar el C. Como resultado habrá una mayor liberación y pérdida de C como CO₂ hacia la atmósfera, sin embargo, una mayor cantidad de materia orgánica con compuestos lábiles aumentaría los valores del cociente metabólico [30, 31].

2.4. Pastizales utilizados para ganadería.

Los pastizales son áreas donde la vegetación predominante son las gramíneas (pastos) y otras herbáceas, cuentan con pocos árboles o ausencia de éstos [5]. Se desarrollan en lugares donde llueve con poca frecuencia como para desarrollar vegetación de bosques templados, pero en exceso para el crecimiento de vegetación propia del desierto. Además, cuentan con alta fertilidad y productividad, por lo que han sido utilizados para la ganadería y la agricultura [32]. Los pastizales se ven amenazados por el cambio de uso de suelo, la fragmentación de los ecosistemas, el cambio climático y el mal manejo en la ganadería. Al verse afectados los pastizales, los servicios que brindan como alimento del ganado bovino, además del secuestro y retención de C, se han visto afectados negativamente [6].

En México, los pastizales utilizados en la ganadería se encuentran en zonas con climas áridos y semiáridos en el norte y centro del país, los pastizales naturales forman parte del 5% del uso de suelo en México, mientras los pastizales inducidos o cultivados alcanzan el 9.8% [33]. Las actividades ganaderas hacen uso del 57% del territorio mexicano, y en el 2021 su aportación económica fue de 531 mil 739 millones de pesos [34, 35]. Gran parte de estas actividades ganaderas se desarrollan en el desierto Chihuahuense, el cual se extiende por los estados de Chihuahua,

Sonora, Coahuila, Nuevo León, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí, contribuyendo de manera importante en la modificación del paisaje por la explotación de los pastizales [5].

Para hacer uso de los pastizales, en la ganadería se cuenta con sistemas de pastoreo, los cuales incluyen prácticas diseñadas para el manejo en conjunto de animales, plantas, suelo y estructura del rancho, así como el tiempo de pastoreo y los periodos de descanso entre cada pastoreo. Entonces, el manejo de pastizales ganaderos se refiere a las decisiones que toma el ganadero acerca de cantidad, alimentación complementaria y entrecruzamiento de los animales, además del área y tiempo de pastoreo en el pastizal [36]. El pastoreo de ganado convencional generalmente se enfoca en las necesidades de producción y en la demanda de alimentos, por lo que suelen ser intensivas y no permiten la recuperación de la vegetación y el suelo, lo que a su vez conduce al sobrepastoreo [37]. La práctica general consiste en la delimitación de grandes extensiones y la liberación de una cantidad estimada de animales, los cuales consumen los recursos sin ningún control del área o tiempo. De esta forma, los animales consumen los recursos de manera discrecional, consumiendo la vegetación mayor palatabilidad, además de concentrarse en ciertas áreas circundando los bebederos [38].

En el pastoreo extensivo, el cálculo de capacidad de carga que sirve a los ganaderos para determinar la cantidad de animales asignadas a cierta área es una aproximación teórica basada en generalidades y considerando un ecosistema sin degradar [39]. De tal forma que, al regionalizar y usar los recursos se ha producido un sobrepastoreo histórico en los sitios que han aplicado este manejo convencional extensivo. El sobrepastoreo aumenta la maleza de especies no deseadas, reduce la cobertura vegetal y aumenta la compactación del suelo alterando su estructura. Al aumentar la intensidad del pastoreo, la biomasa, la altura y la productividad de la vegetación disminuyen, perdiendo reservas del COS y nutrientes provocando una degradación del ecosistema y del suelo [37]. Además, estas prácticas aumentan las emisiones de los GEI al perturbar la vegetación y propiedades del suelo, ya que requieren fertilizantes, herbicidas y plaguicidas para alcanzar las necesidades de producción de alimentos que se requieren hoy en día [40]. El aumento de la población ha generado una mayor demanda de alimentos, por lo que las prácticas agrícolas se han intensificado para satisfacer las necesidades de la población, sin embargo, las prácticas convencionales que se han utilizado han resultado en una inseguridad alimentaria [3].

Las buenas prácticas ganaderas se definen como aquellas que aseguran la calidad del producto de origen animal, mientras mantienen o mejoran las condiciones del medio ambiente. Los ranchos que utilizan estas prácticas por al menos 10 años tienen pastizales en mejores condiciones en comparación con el manejo convencional. Algunas de estas buenas prácticas se enlistan en la Tabla 1. Dentro de estas buenas prácticas se encuentra el manejo holístico. De acuerdo con este manejo, se reconoce a la naturaleza de una manera integral donde todo se encuentra conectado, cualquier decisión tomada sobre el manejo de recursos, debe tener en cuenta los efectos sobre la calidad de vida del ganadero/agricultor, la sociedad, la economía, el ambiente y los efectos en la salud del suelo [41].

Las prácticas utilizadas en el manejo holístico implican prácticas de pastoreo rotativo adaptativo y de alta intensidad de animales, en conjunto con el marco de toma de decisiones. No se indica la cantidad de animales ni el tiempo de rotación entre potreros, porque el sobrepastoreo no es inducido por la cantidad de animales, si no, por el tiempo que el suelo es expuesto a estos animales y el tiempo de recuperación que se le brinda al suelo entre cada pastoreo. Por lo anterior, estas prácticas sugieren aumentar la cantidad de animales y rotarlos rápidamente dejando un tiempo de recuperación de la vegetación y el suelo de meses o hasta 1 año [41].

Tabla 1. Comparación de buenas prácticas ganaderas vs manejo ganadero convencional. Sintetizado de Hoth, 2012 [8].

	Aspecto ambiental/ productivo	Manejo ganadero tradicional	Buenas prácticas ganaderas
Manejo de pastizal	Sistema de pastoreo	Pastoreo extensivo	Manejo holístico/racional/controlado
	Ocupación de potreros (área o unidad de manejo)	Pastoreo continuo	Tiempos definidos de ocupación y recuperación de la vegetación
	Manejo de carga animal	No controlado	Carga de ganado de acuerdo con el forraje disponible
	Rehabilitación y mejora de pastizales	No hay programas para la rehabilitación	Rehabilitación continua en áreas degradadas. Uso del ganado como mejora de pastizales. Conservación de los suelos
	Alimentación	Forraje de pastizales e insumos externos	Forraje de pastizales
	Monitoreo	Ausente o mínimo	Sistemático, continuo e integral
Efectos en el ecosistema	Cobertura vegetal basal y área	<	>
	Cantidad de espacios de suelo desnudo	≥	≤
	Diversidad de especies	<	>

En otras palabras, el manejo holístico utiliza pastoreo intenso con adición de grandes cantidades de estiércol y pisoteo del suelo por cortos periodos de tiempo, dejando un proceso de recuperación largo en el suelo. Como resultado, se aumenta la producción de plantas, la capacidad de infiltración de agua, el secuestro de C, deteniendo la degradación del suelo y brindando una mejor calidad de vida para los ganaderos. Por lo que estas prácticas han demostrado una capacidad de regenerar pastizales, resiliencia, mitigación del cambio climático y reducir la desertificación, mientras se mantiene y mejora la producción de alimentos y productos secundarios (pieles, fibras, etc.) [41].

Por otro lado, otro manejo de pastizales alternativo es el regenerativo (Fig. 2), el cual incluye una serie de prácticas que buscan mantener la productividad a largo plazo además de minimizar insumos externos (fertilizantes, combustibles fósiles) y minimizar los espacios temporales del suelo desnudo a través de la integración de operaciones de ganadería y rotación de ganado [42]. En el manejo regenerativo se utiliza el pastoreo no selectivo, en este se elimina el forraje en un corto tiempo, dejando tiempos de recuperación prolongados. Al tener una mayor cantidad de ganado en un espacio reducido, se genera competencia entre los animales por el alimento, pisotean la materia vegetal no consumida incorporándola al suelo y brindan excremento como fertilizante. Lo anterior aumenta la entrada de MOS, nutrientes y la capacidad de carga de los pastizales aumenta del 25 al 100%. Este manejo no permite que el ganado seleccione la vegetación a consumir, por lo que las hierbas no deseadas también son consumidas al igual que los pastizales con mayor aportación nutrimental [43, 44]. Estas prácticas aprovechan el ecosistema, utilizando al ganado como herramienta para apisonar y como insumo de sustrato a través de las excretas de los animales, teniendo como resultado un aumento de la MOS, en consecuencia, se incrementa el follaje y la capacidad de almacenamiento de agua.

Para poder denominar estas prácticas como manejo sostenible del suelo, es necesario realizar una evaluación con el fin de verificar si la producción de biomasa vegetal (pastura) para la alimentación del ganado no afecta las funciones del suelo y sus servicios ecosistémicos, ambos asociados al contenido de COS [45].



Figura 2. Manejo regenerativo (a la izquierda de la cerca) vs manejo convencional continuo (a la derecha de la cerca). Rancho Los Robles, Chihuahua, México [8].

2.5. Manejo sostenible del suelo

Ante la presión humana sobre los recursos del suelo, los gobiernos y científicos del mundo se han enfocado en el desarrollo de prácticas sostenibles para preservar los recursos y servicios ambientales [46]. Precisamente para la evaluación del manejo sostenible de suelos con uso agropecuario, la FAO ha desarrollado una serie de directrices que incluyen protocolos y métodos para el monitoreo, reporte y verificación en los cambios de almacenamiento del COS y en los sistemas productivos [47].

Dentro de estos lineamientos, la FAO ha creado un protocolo para la evaluación de la gestión sostenible del suelo, usando indicadores de los procesos más importantes del suelo y sus interacciones [9]. Tales indicadores se describen a continuación:

- Productividad del suelo: suele ser un indicador secundario sobre la salud del suelo, pero es de los principales en el manejo sostenible del suelo para conocer la capacidad del suelo de producir biomasa y el rendimiento del producto. Se determina a través de la productividad vegetal (por biomasa seca o productividad agrícola en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$).
- Carbono orgánico del suelo: es uno de los indicadores de mayor importancia, se encuentra relacionado con la estructura del suelo (incluye porosidad y capacidad de retención de agua), cantidad de nutrientes disponibles y fauna.
- Propiedades físicas del suelo: en específico la densidad aparente ($kg\ dm^{-3}$), los cambios en esta variable reflejan las modificaciones por la compactación y porosidad de los suelos, lo que a su vez influye en los flujos de nutrientes y agua.

- Actividad biológica del suelo: se utiliza la medición de la tasa de respiración ($\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$), la cual indica el estado de los organismos biológicos del suelo. Las perturbaciones como contaminación, condiciones edafoclimáticas y salinidad provocan una rápida respuesta en la actividad biológica, misma que se verá reflejada en las propiedades del suelo. Esta medición debe ser complementada con otra de actividad biológica (cuantificación del C de la biomasa microbiana).

Otros indicadores recomendados para complementar la evaluación del manejo sostenible son: nutrientes (potasio, fósforo y nitrógeno), actividad biológica del suelo (complementando la tasa de respiración del suelo con actividad enzimática o biomasa microbiana), pH, capacidad de retención de agua, tasa de infiltración, resistencia a la penetración del suelo y contaminación.

Estos indicadores son comparados con los parámetros de control, generalmente se toman muestras antes del establecimiento de las prácticas del manejo sostenible (línea base) y posteriormente se comparan con muestras obtenidas después de aplicar el manejo sostenible al suelo. Si se mantienen o mejoran los indicadores, se puede inferir que el manejo del suelo es sostenible. Otra opción es comparar los parámetros estimados de manejo sostenible con sitios adyacentes sin prácticas sostenibles (control) [9].

3. Justificación

El suelo es uno de los mayores sumideros y fuentes de C, dependiendo de su uso y manejo. En la actualidad las prácticas convencionales del manejo agropecuario han degradado el suelo al punto de perder sus funciones. La aplicación del manejo sostenible permite conservar las propiedades del suelo y sus servicios ecosistémicos, garantizando la seguridad alimentaria de la población, además de ser utilizado como medida para mitigar el cambio climático. Sin embargo, la comprobación de la sostenibilidad de los manejos alternativos de pastizales aún está en evaluación, por lo que es necesario determinar si las prácticas que se han considerado buenas en ranchos del desierto Chihuahuense son efectivamente sostenibles de acuerdo con el protocolo desarrollado por la FAO. La evaluación del manejo sostenible del suelo se basa en la evaluación del carbono orgánico que es almacenado anualmente por la aplicación de buenas prácticas productivas, manteniendo propiedades y procesos fundamentales de los suelos.

Al comprobar que el manejo holístico y el manejo regenerativo aplicado en los pastizales ganaderos del desierto Chihuahuense cumplen con el objetivo de sostenibilidad de los suelos de acuerdo con la FAO, además de la cuantificación del almacenamiento de COS, se promovería una mayor implementación en los pastizales ganaderos de estas prácticas en la región, con múltiples co-beneficios para los productores y el planeta. Más allá, identificar los factores que controlan la capacidad de almacenamiento del COS y la actividad biológica es un avance importante en el entendimiento del ciclo del carbono en los sistemas productivos sostenibles.

4. Hipótesis

La aplicación de prácticas de manejo regenerativo y manejo holístico en los pastizales ganaderos del desierto Chihuahuense aumentarán o mantendrán los indicadores del suelo recomendados de la FAO y la tasa de almacenamiento, lo cual resultará en la re-carbonización de los suelos y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos que proveen, por lo que estas prácticas pueden ser consideradas de manejo sostenibles. Además, los principales controles de la actividad biológica del suelo y por lo tanto de la modificación del almacenamiento de C, serán los factores limitantes en cada región, en este caso, la baja humedad y la alta temperatura del suelo.

5. Objetivo

5.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la aplicación del manejo holístico y el manejo regenerativo en los indicadores del suelo recomendados por la FAO y en el almacenamiento de C en los pastizales ganaderos del desierto Chihuahuense en comparación con el manejo convencional para poder considerar estas prácticas alternativas como sostenibles.

5.2. Objetivos particulares

- a) Cuantificar los indicadores del manejo sostenible del suelo recomendados por la FAO en las zonas áridas del desierto Chihuahuense para evaluar si los manejos aplicados al suelo en el pastoreo de ganado pueden ser considerados como sostenibles.
- b) Determinar el efecto de los manejos alternativos (holístico y regenerativo) sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo en comparación con su respectivo control de manejo convencional.
- c) Identificar los factores que controlan la actividad biológica de los suelos de pastizales a través de la medición de la respiración del suelo y el COS para establecer el factor que más contribuye a las modificaciones en el almacenamiento del carbono.

6. Metodología Científica

6.1. Selección de áreas de muestreo

Para evaluar el manejo sostenible de los pastizales ganaderos del desierto Chihuahuense con prácticas alternativas de pastoreo, se seleccionaron áreas con manejo holístico y con manejo regenerativo, mismas que fueron comparadas con áreas adyacentes de manejo convencional extensivo como control. Las parcelas seleccionadas que utilizan el manejo holístico se encuentran en el rancho Valle Colombia, ubicado en el municipio de San Buenaventura del estado de Coahuila de Zaragoza ($28^{\circ} 22' 0.120''$ N $102^{\circ} 17' 60.000''$ O; Fig. 7), dentro del desierto Chihuahuense. Estas zonas se caracterizan por poseer suelos tipo leptsol y calcisol [48].

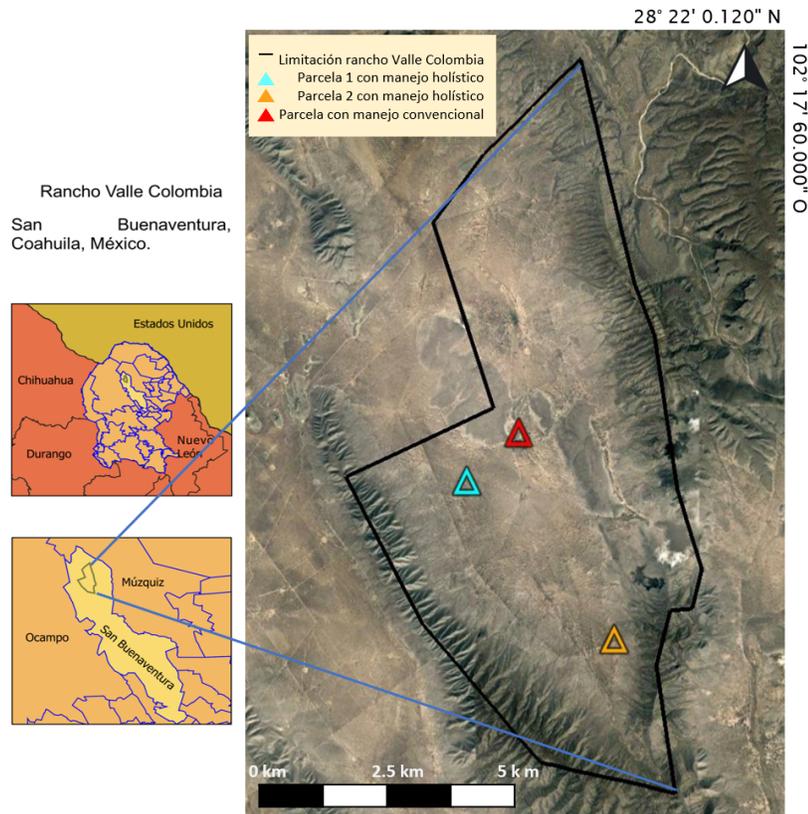
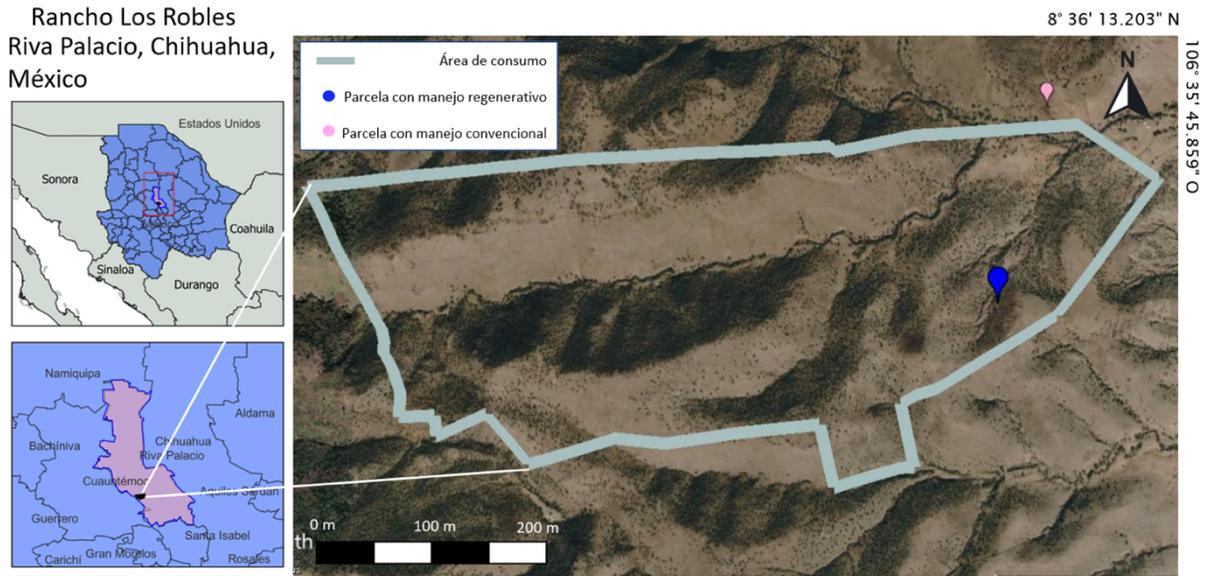


Figura 7. Ubicación del rancho Valle Colombia.

La parcela con manejo regenerativo se ubica en el rancho Los Robles, en el municipio de Riva Palacio del estado de Chihuahua (8° 36' 13.203" N 106° 35' 45.859" O; Fig. 8), en el desierto Chihuahuense. Los tipos de suelo predominantes en esta parcela son de tipo durisol y calcisol [48].

Figura 8. Ubicación del rancho Los Robles.



Se seleccionaron áreas de cada manejo representativas en términos productivos, mismas a las que se les cálculo el índice de vegetación mejorado (EVI). Este índice es un parámetro calculado con valores de reflectancia a diferentes longitudes que son registradas por satélites de teledetección para generar imágenes que realzan la vegetación y minimizan otros detalles (suelo, agua e iluminación) [49]. Para ello, se utilizó información satelital a través de la plataforma Google Earth Engine, con el sensor espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) y la base de datos MOD13Q1 (16 días con resolución de 250 m). Para obtener el EVI, el sensor MODIS recolecta imágenes satelitales de la actividad en la vegetación con un intervalo de 16 días, en una resolución espacial de 250 m, con la finalidad de obtener un mapa cuadrículado en pixeles que representan los datos del EVI, obtenidos con la ecuación 1.

$$EVI = G \frac{NIR - Red}{NIR + C1Red - C2Blue + L} \quad [ec. 1]$$

donde:

NIR, Red, Blue = reflectancias superficiales corregidas parcial o totalmente de la atmósfera

L = ajuste del fondo del dosel para la transferencia de radiación roja

C1 y C2 = coeficientes del término de resistencia a los aerosoles

Para calcular el EVI se consideró el periodo comprendido entre el primero de junio del 2016 hasta el primero de agosto del 2021. El promedio obtenido representa 16 días de medición por 5 años de mediciones, este valor se divide entre 10,000 para tener una escala de -1 a +1.

De esta manera, el mapa generado con EVI comprende pixeles de colores que se encuentran en escala de -1 a +1. De acuerdo con los valores de EVI (Fig. 9), +1 a +0.8 corresponde a coberturas muy densas de vegetación, de +0.8 a +0.6 representa coberturas densas, +0.6 a +0.4 significa cobertura promedio, +0.4 a +0.2 cobertura escasa y +0.2 a 0.0 corresponde a suelo desnudo, valores de 0 a -1 representan agua, glaciación, hielo [50]. Esta información únicamente se utilizó para la selección de las parcelas de muestreo.

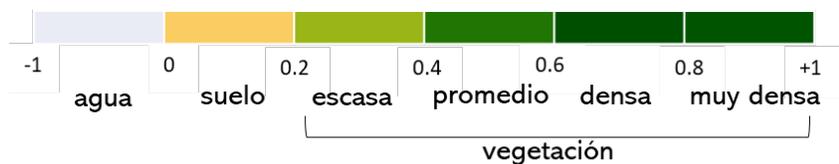


Figura 9. Valores de EVI en escala de -1 a +1.

6.2. Diseño de muestreo

En los pastizales ganaderos con manejo holístico se seleccionaron 3 parcelas de 200 x 200 m. En cada parcela se muestreo el suelo en 10 puntos utilizando el método radial, mientras que, para la vegetación se muestrearon 3 puntos aleatorios dentro de la misma parcela (Fig. 10). De las parcelas seleccionadas, dos son representativas del manejo holístico y la tercera es su control representativo del manejo convencional. Esta última se considera por el propietario como área castigada porque se utiliza como potrero para el ganado en venta y en este sitio no se aplica el manejo holístico. De acuerdo con la FAO, para la evaluación del manejo sostenible es necesario realizar una comparación del manejo sostenible aplicado entre un área de control adyacente, con el fin de determinar la tasa de almacenamiento de C por lo cual, para el estudio se seleccionaron áreas control para ser comparadas con la aplicación del manejo sostenible.

Mientras que, para los pastizales ganaderos con manejo regenerativo se seleccionó 1 parcela de 200 x 200 m con 15 meses de reposo, su respectivo control con manejo convencional fue un sitio adyacente al rancho Los Robles. En ambos sitios se tomaron 10 muestras de suelo y 3 de vegetación utilizando el método radial. Los criterios utilizados para la selección de parcelas fue la disponibilidad para realizar las mediciones por parte de los dueños y el acceso a las áreas por vía terrestre.

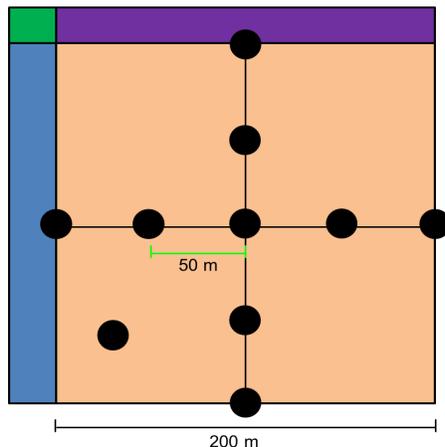


Figura 10. Puntos de muestreo por parcela.

6.3. Muestreo

En cada punto de muestreo se retiró la hojarasca del suelo y se tomó la respiración del suelo como se describe más adelante, posteriormente se tomó una muestra de 500 g de los primeros 10 cm del suelo con ayuda de una pala. La respiración del suelo y la toma de muestras se realizó en octubre del 2021. La temperatura ambiente promedio en los días de toma de muestras fue de 30 °C en los pastizales ganaderos del rancho Valle Colombia y de 31°C en los pastizales ganaderos del rancho Los Robles, sin precipitaciones durante el muestreo, ni los tres días anteriores en ambas áreas.

Las muestras de suelo se guardaron en bolsas plásticas correctamente identificadas con etiquetas y plumón indeleble y fueron trasladadas al laboratorio en una hielera común con hielos para mantenerlas frías durante el traslado de los sitios de muestreo hasta el laboratorio, que fue un tiempo aproximado de 5 días. Se tomó una submuestra que se congeló a -20 °C al arribar al laboratorio para la determinación de la biomasa microbiana. El resto de la muestra de suelo se secó a 105°C durante una semana y se tamizó a 2 mm para la determinación del pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, materia orgánica, carbono total, nitrógeno total, nutrientes y textura del suelo [51, 52]. Para el muestreo de vegetación se consideró una superficie de 1m², la vegetación dentro de esa superficie fue cortada con tijeras dejando las raíces de la planta. Durante el muestreo se realizó una entrevista a los propietarios de los ranchos para recabar información sobre el pastoreo que realizan en sus ranchos, se incluye su experiencia con el manejo aplicado y los resultados obtenidos (Fig. 11).



Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN



Proyecto: Evaluación del manejo sostenible del suelo en pastizales ganaderos en zonas áridas como indicador de su re-carbonización

Nombre: _____

Rancho: _____

Tiempo de pastoreo en cada potrero	
Tiempo de descanso entre cada pastoreo	
Cantidad de carga animal por potrero (máxima y mínima)	
Potrerros utilizados simultáneamente	
Insumos externos (fertilizantes, energía, agua, maquinaria, alimentación del ganado)	
Frecuencia de monitoreo de los potrerros	
Tiempo de antigüedad de la aplicación de buenas prácticas	

Adición de materia orgánica (si/no)	
Riego natural o externo	
Especie de los pastizales, mencionar si son introducidos o naturales	
Pastoreo de área por año	

En términos generales, ¿en qué consiste el sistema de manejo de pastizales que ha aplicado?

¿Qué mejoras ha observado con la adopción de las buenas prácticas en el manejo de pastoreo?

Comentarios adicionales.

Figura 11. Encuesta realizada a los propietarios de los ranchos ganaderos.

6.4. Medición de indicadores

Se evaluaron los indicadores del protocolo de manejo sostenible del suelo de la FAO [9]:

- a) Productividad del suelo. Se tomó una muestra de la biomasa de los pastos presentes en 3 subparcelas de 1 m² [9]. Posteriormente, se utilizó un horno de convección Thermo Scientific™ y un horno de aire forzado Thermo Scientific™ para secar la vegetación a una temperatura de 70 °C hasta llegar a peso constante (Fig. 12).



Figura 12. Peso de la vegetación seca.

- b) Tasa de respiración en el campo. La liberación de CO₂ del suelo hacia la atmósfera (respiración del suelo) se midió con la cámara de respiración del equipo EGM-5 (PP Systems, USA) y con la cámara dinámica SRC-2 durante 60 segundos. El equipo EGM-5 mide continuamente el flujo de CO₂, consta de una fuente de infrarrojo, celda de muestra de volumen y longitud de trayectoria conocido, filtro de interferencia óptica y detector de infrarrojos. La fuente infrarroja (IR) emite una luz de longitud de onda del infrarrojo medio, que pulsa la celda. A su vez, el filtro de interferencia óptica reduce la banda emitida por el IR. Tan pronto como la celda sea llenada por el gas muestra, el CO₂ absorbe energía IR a 4.26 μm, mientras tanto se mide la radiación IR que llega al detector. Una mayor cantidad de CO₂ dará como resultado una menor señal IR recibida por el detector [53]. A la par se determinó la temperatura y humedad del suelo con un sensor Hydraprobe II (Stevens), mientras que la temperatura y humedad relativa se midió con una microestación WatchDog; por último, se midió la radiación fotosintéticamente activa (PAR), con un sensor MQ-200 (Fig. 13).



Figura 13. Equipo EGM-5 (PP Systems, USA) con cámara dinámica SRC-2 y el sensor Hydraprobe II (Stevens) en el sitio de estudio.

- c) Biomasa microbiana del suelo. Se utilizó el método de fumigación-extracción, como se indica en la figura 15. En este método, una muestra de suelo es fumigada con cloroformo (CHCl_3) para lisar las células microbianas y el C es expulsado de la biomasa microbiana. El C se extrae con sulfato potásico (K_2SO_4) 0.5 M, después se añade 98 mg por muestra de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) y por último se le añade ácido sulfúrico al 98% (H_2SO_4). Posteriormente, la concentración de C extraído de la biomasa microbiana es cuantificada mediante el espectrofotómetro a 590 nm, donde se comparan muestras fumigadas y no fumigadas (Fig. 14) [54].

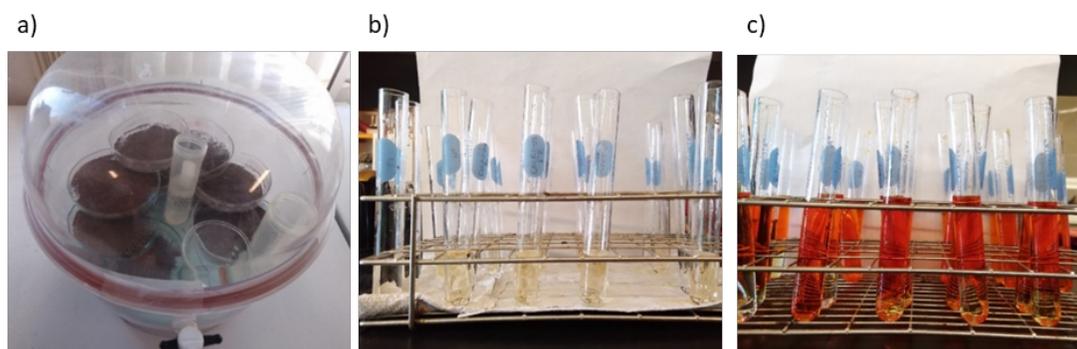


Figura 14. a) Desecador con muestras de suelo para la determinación de biomasa microbiana, contiene agua y cloroformo; b) muestras sin H_2SO_4 y $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$; c) muestras con H_2SO_4 y $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

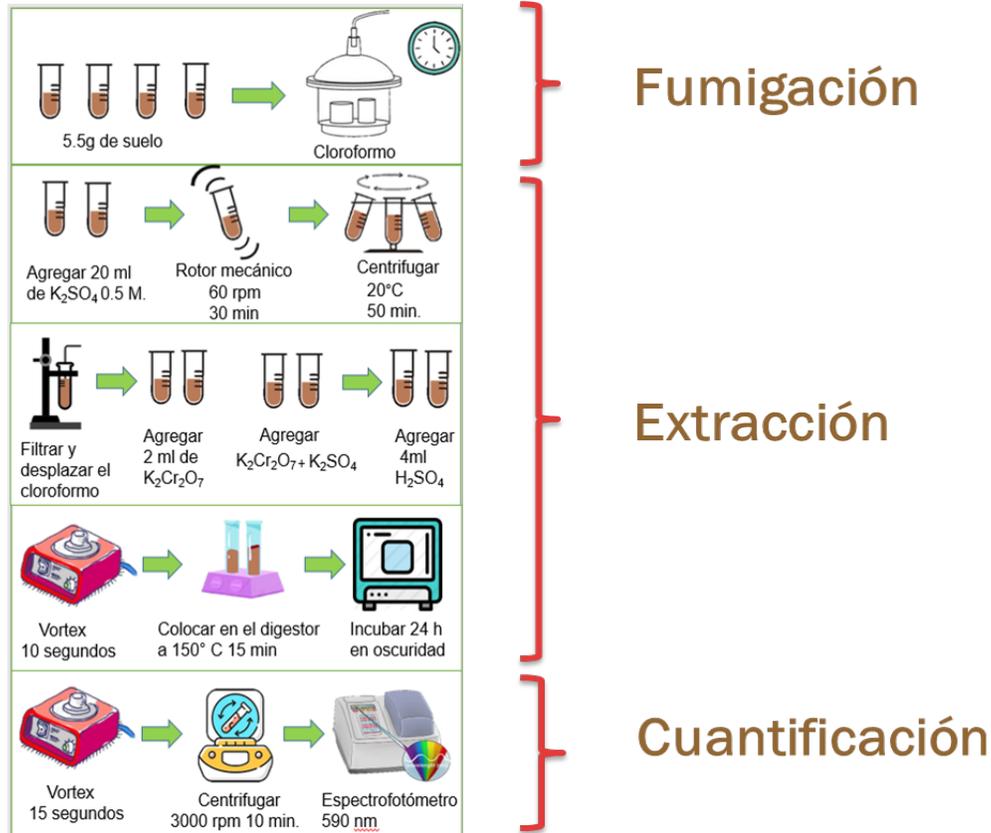


Figura 15. Representación gráfica del método de fumigación-extracción para biomasa microbiana.

- d) Contenido de carbono total en el suelo. Se utilizó el método de combustión seca Dumas, el cual consiste en calentar la muestra de suelo a alta temperatura ($>900\text{ }^{\circ}\text{C}$) para descomponer el C y transformarlo a óxidos. Con el fin de analizar la cantidad de óxidos de carbono de la muestra se utilizó un autoanalizador Elemental Thermo Scientific™ FlashSmart™ 2000 con configuración analítica CHNS/O [55].
- e) Contenido de materia orgánica. Se utilizó el método gravimétrico o pérdida por ignición. La muestra se pesó antes de colocarla en la mufla a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 4 h, una vez finalizado el proceso de ignición se pesó la muestra y se comparó con el peso inicial (Fig. 16) [56].

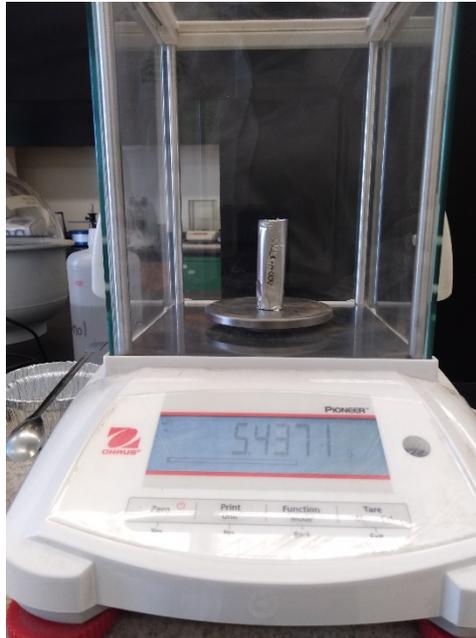


Figura 16. Peso final de la muestra

- f) Densidad aparente. La densidad aparente, se analizó con el método de la probeta mediante el análisis del suelo a un volumen conocido. Posteriormente, es calculada a partir de dos parámetros: la masa de los sólidos y el volumen de sólidos de la muestra [57].
- g) Indicadores complementarios. Se midió la humedad del suelo en el laboratorio, con el analizador de humedad MB120 OHAUS. El pH del suelo se midió en una suspensión suelo:agua 1:2 utilizando un medidor de pH digital (ORION STAR A211) (Fig. 17) [52]. Con la misma solución se midió la conductividad eléctrica con el equipo ORION Thermo Scientific™.

Además, se determinó el contenido de nutrientes (Ca^{2+} , Fe^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} y Na^+) del suelo, con el espectrómetro de absorción atómica Thermo Scientific™ iCE™ 3300 AAS y espectrómetro ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy) PerkinElmer™ Optima 8300. La textura del suelo (contenido de arena, limo y arcilla) se determinó con un analizador de tamaño de partícula LA-950 HORIBA Scientific™. Una vez obtenidos los porcentajes de limo, arena y arcilla, se utilizó el triángulo de Bouyoucos para estimar la clasificación de la textura, para este análisis se consideraron cinco muestras de suelo por parcela.



Figura 17. Medición del pH con potenciómetro digital ORION STAR A211

6.5. Análisis y evaluación del manejo sostenible del suelo

6.5.1. Productividad de los pastizales ganaderos

Para obtener una representación de la productividad generada por los pastizales ganaderos las tres subparcelas muestreadas de vegetación se promediaron y los gramos obtenidos en 1 m² se extrapolaron a ton por ha.

6.5.2. Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente del suelo se determinó utilizando un volumen conocido de agua y el peso total en gramos que ocupa el suelo en una probeta de 10 ml.

Una vez que se ha obtenido el peso, se utilizó la ecuación 2.

$$\text{Densidad aparente} \left(\frac{g}{cm^{-3}} \right) = \frac{\text{Peso del suelo}}{\text{Volumen conocido}} \quad [\text{ec. 2}]$$

6.5.3. Determinación de la MOS

Con la finalidad de obtener el porcentaje de MOS representativa de los suelos de pastizales ganaderos con distintos manejos, se utilizó la ecuación 3. Para obtener datos más aproximados de materia orgánica extraíble, se multiplicó por 2/3 el resultado.

$$\text{MOS (\%)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso calcinado}}{\text{Peso inicial}} \times 100 \quad [\text{ec. 3}]$$

6.5.4. Determinación de C en la biomasa microbiana

A fin de obtener la concentración de la biomasa microbiana, es necesario utilizar una curva de calibración para realizar una comparación de los valores con una concentración conocida del componente a estudiar, en este caso el C. Se utiliza la glucosa como la concentración conocida de C y los valores de absorción de la Tabla 2 para realizar la curva de calibración (Fig. 18).

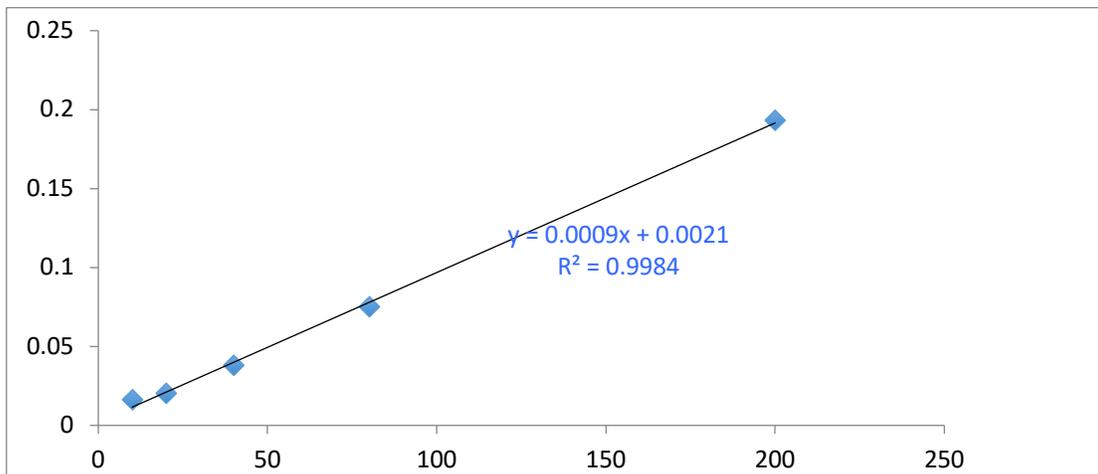


Figura 18. Curva de calibración

Tabla 2. Valores de glucosa y absorción para la curva de calibración.

Glucosa (ppm)	Absorción (590 nm)
10	0.016
20	0.02
40	0.038
80	0.075
200	0.193

A su vez, esta curva debe ser ajustada, como primer paso es restar la absorción producida por el blanco de la absorción de la muestra, ya sea fumigada o sin fumigar. Posteriormente se extrapolan los valores utilizando la pendiente de la curva de calibración. Se calcula la concentración de carbono de las muestras de manera independiente como se indica en la ecuación 4; en la que la *concentración* es el dato extrapolado en la curva de calibración de acuerdo con la absorbancia registrada por cada muestra y 12 es el peso molecular del C.

$$C = \frac{\text{concentración} \cdot 12}{g \text{ suelo seco}} \quad [\text{ec. 4}]$$

Por último, se sustrae la cantidad de C de la muestra fumigada de la no fumigada (control), y se multiplica por un factor de proporción para obtener el C en la biomasa microbiana de los organismos del suelo (ecuación 5).

$$CBM = (C_{muestra\ fumigada} - C_{muestra\ no\ fumigada}) * 2.64 \quad [ec. 5]$$

El valor 2.64 es un valor de proporcionalidad utilizado cuando se emplea el método de fumigación-extracción para que sea comparable con el método de C orgánico extraíble por fumigación con 0.5 M K₂SO₄ [58].

6.5.5. Determinación del cociente metabólico

Para el cálculo del cociente metabólico se utilizó la ecuación 6 [31].

$$qCO_2 = \frac{\text{Respiración del suelo} * \text{Carbono de la biomasa microbiana}}{\text{Materia orgánica del suelo}} \quad [ec. 6]$$

6.5.6. Tasa de almacenamiento de COS en pastizales ganaderos

Una vez cuantificados los indicadores propuestos por la FAO, se analizó y evaluó si las prácticas de manejo regenerativo dan como resultado un aumento en el almacenamiento de C en el suelo en comparación con las prácticas convencionales. Para el cálculo de la tasa de almacenamiento se utilizó la Tabla 3 [47].

Tabla 3. Estimación de la tasa de carbono orgánico del suelo

<i>Manejo</i>	Profundidad del suelo	A	B	C	D=A*B*C	F	G=(DXF)/100
		1ha	DA	CSS	MS	CT	COS
		m ²	t m ³	m	t ha ⁻¹	%	t ha ⁻¹

donde:

A= conversión de ha a m²

B= densidad aparente (DA)

C= espesor capa superior del suelo (CSS)

D= m² de suelo * densidad aparente * espesor de la capa del suelo = masa del suelo (MS)

F= carbono total (CT)

G= (masa del suelo* carbono total) /100 = existencias de carbono orgánico del suelo.

Siendo el COS el factor más importante a determinar en la re-carbonización del suelo, se utilizaron los lineamientos del protocolo para medir, monitorear, reportar y verificar el almacenamiento del COS en la agricultura [47], donde se utilizó la ecuación 7 para determinar el secuestro del COS:

$$COS \text{ almacenado } (t C ha^{-1} año^{-1}) = \frac{COS_{\text{Manejo sostenible}} - COS_{\text{Manejo convencional}}}{\text{Años de aplicación del manejo alternativo}} \quad [\text{ec. 7}]$$

Para el análisis de datos se determinaron las diferencias significativas de cada indicador entre cada sistema de manejo y su respectivo control con Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía. Además, se analizaron las diferencias significativas entre medias con la prueba de Tukey, con un nivel de significancia menor a 0.05. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de los modelos analizados, distribución normal de los residuos, normalidad y varianza constante.

Se realizaron correlaciones de Pearson, para identificar el factor que más contribuye a las modificaciones del contenido del COS y su flujo hacia la atmósfera (respiración), las variables anteriores fueron correlacionadas individualmente con todas las mediciones realizadas. Para ambos casos solo se seleccionaron los factores que se correlacionaron significativamente.

En todos los casos se utilizó el software Statistica v10.0.

7. Resultados y discusión

7.1. Características generales de las áreas de estudio

7.1.1. Rancho Valle Colombia.

El rancho Valle Colombia se encuentra en el municipio de San Buenaventura en el estado de Coahuila, su extensión territorial es de 26,000 ha. Fue fundado en 1939 por el señor William Bernard “Billy” Finan Thompson, las prácticas de pastoreo de ganado con manejo holístico iniciaron en 1980, sin embargo, desde 1950 ya buscaban información sobre alternativas al manejo convencional. En el rancho Valle Colombia se aplica el manejo holístico con pastoreo rotativo, con el método rueda de carreta, el cual consiste en delimitar las áreas de consumo del pastizal en forma de rueda de carreta e ir rotando el ganado por estas secciones para alimentarlo. La delimitación por potrero es de aproximadamente 64 ha, donde se alimentan 1,400 vacas por día. El ganado no consume toda la vegetación, pero una vez utilizada el área se deja descansar por un periodo mínimo de 3 meses. En este rancho no se utiliza maquinaria, únicamente se le suministra sal mineral como suplemento alimenticio. Como fertilizante se utiliza el propio excremento del ganado.

Como resultado del manejo holístico el propietario de rancho Valle Colombia, ha observado animales en mejor condición de peso, mayor capacidad de carga animal por área, mayor cobertura vegetal, además de que no es necesario utilizar garrapaticidas ni baños para el ganado. Se considera que las limitantes del manejo aplicado son: precipitación anual, infraestructura y precio del ganado.

El ganado utilizado para el pastoreo es raza hereford, brangus y beefmaster (Fig. 3), la vegetación predominante son los pastizales (p. ej., banderita (*Bouteloua curtipendula*), navajita (*Bouteloua gracilis*), gigante (*Leptochloa dubia*), popotillo plateado (*Bothriochloa barbinodis*), guía (*Panicum obtusum*), sedoso (*Setaria parviflora*)), pero también cuenta con otro tipo de vegetación como mezquite (*Prosopis glandulosa*) y sotol (*Dasyilirion leiophyllum*), entre otros (Fig. 4).



Figura 3. Ejemplares de ganado del rancho Valle Colombia.



Figura 4. Vegetación del rancho Valle Colombia, donde predominan los pastizales.

7.1.2. Rancho Los Robles

El rancho Los Robles, se encuentra ubicado en el municipio de Riva Palacio en el estado de Chihuahua, tiene una extensión territorial de aproximadamente 614 ha. De acuerdo con la información recopilada en la visita para la presente investigación, en el año 2005 se adoptaron prácticas de manejo holístico, pero en 2014 se inició con el manejo regenerativo con pastoreo no selectivo. El pastoreo no selectivo utilizado consiste en pastorear el ganado por 4 horas en un área de 6 ha con 350 vacas, una vez que el ganado haya consumido la vegetación dejando una altura suficiente de 10 cm y 3 hojas para que la planta se recupere (Fig. 5), se rota el ganado hacia otra área hasta que el ijar de la vaca este lleno. Una vez finalizado el pastoreo, se deja descansar el área durante 2 ciclos de lluvia, este periodo puede ser de 18 hasta 24 meses, dependiendo de las condiciones climáticas anuales.

Como fundamento para la aplicación del pastoreo no selectivo se toma en cuenta que, al tener un espacio más reducido y una mayor cantidad de ganado, no se deja que el ganado seleccione la vegetación, por lo que consume todo, tanto hierbas no deseables por su bajo aporte nutricional como la vegetación preferida del ganado. Además, se considera dejar 3 hojas de la planta porque de este modo se conservan las raíces y de acuerdo con sus observaciones en 15 días el pasto ya está en crecimiento, mientras que, si se consume más de esa altura tarda hasta 1 mes para que la vegetación crezca.

De acuerdo con un ejemplo de la aplicación del manejo regenerativo con pastoreo no selectivo dado por el propietario del rancho los Robles: en diciembre del 2021 se utiliza un potrero para

pastorear, una vez utilizada el área para la alimentación del ganado y dejando una altura de 10 cm en planta, se deja descansar hasta junio 2022 sin precipitaciones. Posteriormente, consideran las épocas de lluvia y el potrero se deja en descanso hasta julio 2023. En total el potrero tendría 18 meses de descanso, sin embargo, si se considera que el área no tuvo suficiente descanso se dejan otros 3 meses, en total el tiempo de descanso sería hasta octubre 2023. Por lo cual, se considera que el descanso correcto del potrero utilizado sería 2 ciclos de lluvias. Una vez que el pastizal entre en dormancia, el potrero es utilizado para la alimentación del ganado.

Conforme a la experiencia del propietario, con el manejo regenerativo aplicado se puede tener un máximo rendimiento de 5,000 vacas por hectárea, considerando que con este manejo una vaca puede ser alimentada en 2 m². Además, con una densidad de 1,000 vacas el estiércol se esparce mejor, de acuerdo con los parámetros del manejo regenerativo se considera una ultra alta densidad con una carga de 800 vacas por ható.

Por otro lado, se omite el uso de maquinaria y riego externo, como suplemento alimenticio para el ganado se utilizan 30 g de urea al día. El único insumo añadido al suelo es el estiércol del ganado, del cual se tiene una aproximación de 29 kilos por vaca en el rancho Los Robles, en total serían 10 ton ha⁻¹, por lo que se espera que el suelo tenga mayor humedad, porque en 1 gramo de estiércol se retienen 10 gramos de agua. Sin embargo, la cantidad y calidad del estiércol varía por la cantidad de proteína y por las bacterias del rumen de la vaca.

En este sentido, el monitoreo del ganado es diario por lo cual, sus excretas también son monitoreadas diariamente. La calidad del estiércol está condicionada por la cantidad de proteína del zacate consumido, esto debido a que las bacterias del rumen descomponen con mayor facilidad la lignina y celulosa, al tener pedazos de fibra pequeños (menores a 3 mm) en el estiércol, éste se incorpora con mayor facilidad al suelo. Conforme a las observaciones del estiércol, si se encuentra apelmazado el estiércol en una bola, la fibra es mayor que la proteína. En cambio, si esta aguada, el estiércol tiene mucha proteína y poca fibra.

Para considerar que la vaca está bien alimentada y que se está aprovechando toda la fibra consumida, el tamaño de la fibra debe ser menor a 3 mm en el 70% del estiércol, de lo contrario se agrega proteína. El estiércol bien acondicionado se adiciona al suelo en 8 días.

Además del tipo de pastoreo, el manejo regenerativo aplicado incluye la suplementación alimenticia, la selección genética, la asesoría de expertos en el manejo regenerativo, planeación de las secciones a consumir por año basados en las épocas de lluvia.

De acuerdo con el propietario, como resultado de la aplicación del manejo regenerativo del pastoreo de ganado el rancho Los Robles ha observado vegetación más abundante, aumento de pastos perennes deseables con más altura y mayor forraje. Además, no es necesario el uso de desparasitantes desde hace 16 años, al mantenerse saludable el ganado por el tipo de manejo y monitoreo aplicado, considerando que lleva 9 años de manejo regenerativo y 5 de manejo holístico. El ganado utilizado para el pastoreo son razas hereford y angus. La vegetación del rancho Los Robles cuenta con hasta 48 especies de perennes (p. ej. popotillo plateado *Bothriochloa barbinodis*), zacate gigante (*Leptochloa dubia*), zacate guía (*Panicum obtusum*), zacate sedoso (*Setaria parviflora*), zacate lobero (*Lycurus spp.*), pastizal banderita (*Bouteloua curtipendula*), pasto tallo azul (*Andropogon gerardii*), navajita (*Bouteloua gracilis*), pasto llorón (*Eragrostis curvula*). Otro tipo de vegetación que se puede encontrar es el mezquite (*Prosopis glandulosa*) (Fig. 6).

Figura 6. Vegetación característica del rancho Los Robles.



7.2. índice de vegetación mejorado de las parcelas muestreadas

En la figura 19, se muestra el mapa del EVI de los pastizales ganaderos del rancho Valle Colombia. De acuerdo con las estimaciones del índice de vegetación, el promedio en la parcela 1 (P1) con manejo holístico fue de +0.2, este valor de acuerdo con la escala del EVI representa suelo desnudo, mientras que, en la parcela 2 (P2) con manejo holístico el promedio fue de +0.3, mismo que corresponde a una cobertura de vegetación escasa. Por otro lado, el suelo del manejo convencional tuvo valores promedio de +0.2 que implican suelo desnudo. Las estimaciones obtenidas del EVI se muestran en la Tabla 5.

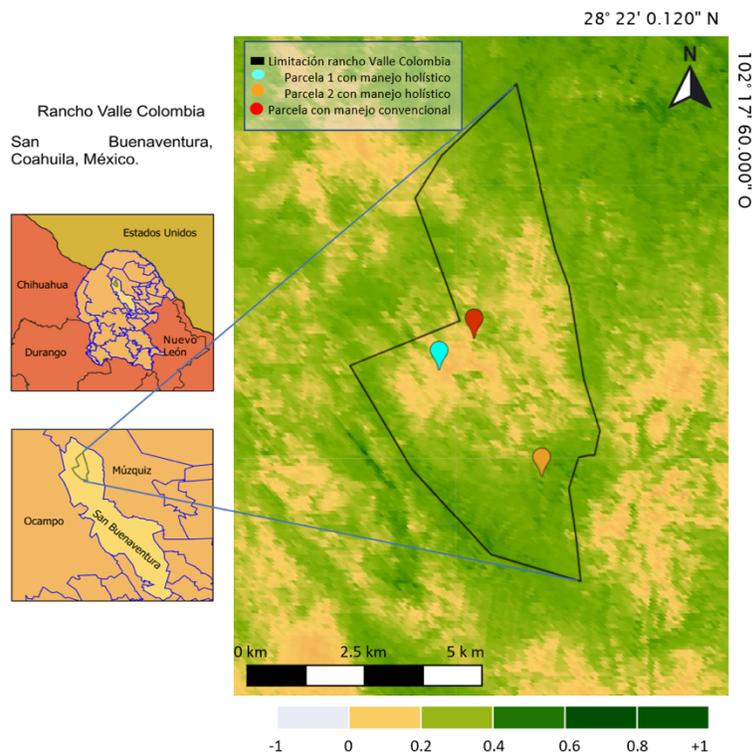


Figura 19. Imagen satelital del índice de vegetación mejorado-formada por píxeles de 250 m del rancho Valle Colombia, obtenida con Google Earth Engine.

Tabla 4. Índice de vegetación mejorado de los 10 puntos muestreados por parcelas del manejo holístico y su respectivo control.

Manejo convencional		Manejo holístico			
Control	EVI	Parcela 1	EVI	Parcela 2	EVI
CKVC-1-001	0.21	VC-1-001	0.17	VC-2-001	0.25
CKVC-1-002	0.21	VC-1-002	0.18	VC-2-002	0.25
CKVC-1-003	0.21	VC-1-003	0.18	VC-2-003	0.27
CKVC-1-004	0.21	VC-1-004	0.18	VC-2-004	0.27
CKVC-1-005	0.21	VC-1-005	0.18	VC-2-005	0.27
CKVC-1-006	0.21	VC-1-006	0.17	VC-2-006	0.25
CKVC-1-007	0.21	VC-1-007	0.17	VC-2-007	0.32
CKVC-1-008	0.21	VC-1-008	0.18	VC-2-008	0.27
CKVC-1-009	0.18	VC-1-009	0.17	VC-2-009	0.34
CKVC-1-010	0.18	VC-1-010	0.17	VC-2-010	0.27
Promedio	0.21	Promedio	0.18	Promedio	0.28

Se muestran los valores promedio, los puntos de muestreo están identificados con su número de identificación. EVI= Índice de vegetación mejorado. Las letras en negritas representan el promedio por parcela.

El mapa del EVI del área de consumo del rancho Los Robles se muestra en la figura 20. En las parcelas muestreadas a las que se les aplica el manejo regenerativo, así como las parcelas con manejo convencional presentaron +0.5 en promedio, mismo que, corresponde una cobertura *promedio* de vegetación de acuerdo con la escala del EVI. Los resultados de la estimación de la cobertura de vegetación de los pastizales ganaderos se muestran en la Tabla 5.

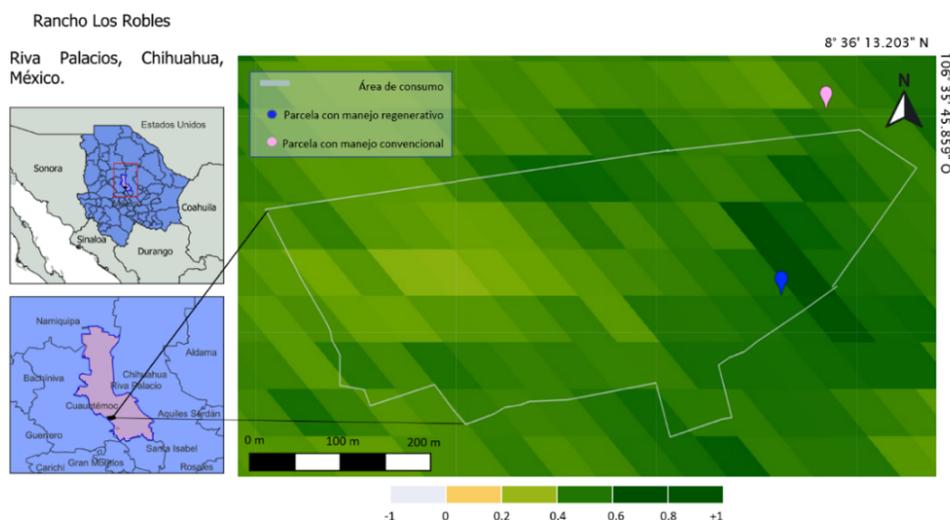


Figura 20. Imagen satelital del índice de vegetación mejorado del área de consumo del rancho Los Robles por píxeles de 250 m, obtenida con Google Earth Engine.

Tabla 5. Promedios del índice de vegetación modificado de suelos con manejo convencional y manejo regenerativo.

Manejo convencional	Manejo Regenerativo
---------------------	---------------------

<i>Control</i>	EVI	<i>Parcela</i>	EVI
CKLR-1-001	0.45	LR-1-001	0.53
CKLR-1-002	0.48	LR-1-002	0.53
CKLR-1-003	0.51	LR-1-003	0.53
CKLR-1-004	0.51	LR-1-004	0.52
CKLR-1-005	0.45	LR-1-005	0.52
CKLR-1-006	0.45	LR-1-006	0.52
CKLR-1-007	0.48	LR-1-007	0.60
CKLR-1-008	0.48	LR-1-008	0.53
CKLR-1-009	0.45	LR-1-009	0.53
CKLR-1-010	0.45	LR-1-010	0.53
Promedio	0.47	Promedio	0.53

Se muestran los valores promedio, los puntos de muestreo están identificados con su número de identificación. EVI= Índice de vegetación mejorado. Las letras en negritas representan el promedio por parcela.

El estudio de la productividad de los pastizales ganaderos con EVI permitió la selección de parcelas representativas de los ranchos estudiados. Esta selección se realizó de acuerdo con lo indicado por la FAO, incluyendo en cada caso un área control en la que no se aplican las prácticas sostenibles [9].

7.3. Caracterización fisicoquímica del suelo de pastizales ganaderos

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo de pastizales ganaderos de Valle Colombia con manejo holístico y su respectivo control de manejo convencional se presentan en la tabla 6.

La textura del suelo de los pastizales ganaderos con manejo convencional presentó una textura de 80.5, 3.7 y 15.8 % de limos, arcilla y arena respectivamente. Mientras que, el manejo holístico tuvo 85 % de limos, 3.2% de arcilla y 11.8% de arena. Como resultado ambos sitios tienen una textura franco-limosa.

Tabla 6. Caracterización fisicoquímica del suelo de pastizales ganaderos con manejo holístico con su respectivo control de manejo convencional. Los valores muestran el promedio \pm el error estándar. Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre manejos.

	Manejo convencional	Manejo holístico		<i>F</i>	<i>p</i>
	<i>Control</i>	<i>Parcela 1</i>	<i>Parcela 2</i>		
<i>pH</i>	7.8 ± 0.02 ^a	7.7 ± 0.03 ^{ab}	7.6 ± 0.01 ^b	10.7	<0.001
<i>Conductividad eléctrica (dSm⁻¹)</i>	2.9 ± 329 ^a	1.8 ± 309 ^a	2.2 ± 412 ^a	2.46	0.103
<i>Densidad aparente (g/cm³)</i>	1.04 ± 0.01 ^b	1.02 ± 0.001 ^b	1.08 ± 0.01 ^a	7.52	0.02
<i>Nitrógeno total (%)</i>	0.17 ± 0.01 ^b	0.20 ± 0.01 ^b	0.29 ± 0.03 ^a	10.40	<0.001
<i>Materia orgánica (%)</i>	2.6 ± 0.12 ^a	3.31 ± 0.56 ^a	3.34 ± 0.31 ^a	1.45	0.025
<i>Carbono total (%)</i>	5.9 ± 0.1 ^{ab}	5.5 ± 0.2 ^b	6.6 ± 0.4 ^a	4.50	0.020
<i>C:N</i>	35.7 ± 2.17 ^a	27.4 ± 1.15 ^b	23.7 ± 1.02 ^b	15.7	<0.001
<i>Ca²⁺</i>	17.9 ± 0.6 ^a	14.8 ± 0.3 ^b	14.8 ± 0.7 ^b	9.92	<0.001
<i>Fe²⁺</i>	1.39 ± 0.05 ^b	1.95 ± 0.03 ^a	1.20 ± 0.06 ^c	69.65	<0.001
<i>K⁺</i>	0.44 ± 0.03 ^b	0.64 ± 0.02 ^a	0.23 ± 0.02 ^c	71.55	<0.001
<i>Mg²⁺</i>	0.53 ± 0.03 ^b	0.77 ± 0.02 ^a	0.33 ± 0.02 ^c	82.23	<0.001
<i>Mn²⁺</i>	0.06 ± 0.004 ^a	0.07 ± 0.002 ^a	0.04 ± 0.003 ^b	16.10	<0.001
<i>Zn²⁺</i>	0.007 ± 0.0004 ^b	0.008 ± 0.0002 ^a	0.005 ± 0.0003 ^c	35.43	<0.001
<i>Na⁺</i>	0.055 ± 0.001 ^a	0.045 ± 0.002 ^b	0.038 ± 0.002 ^c	22.18	<0.001

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo de pastizales ganaderos del rancho Los Robles con manejo regenerativo y su respectivo control de manejo convencional se presentan en la tabla 7.

Los suelos de pastizales ganaderos con manejo regenerativo y los del manejo convencional, del estado de Chihuahua presentaron una textura franco-limosa, con 65.8 % de limos, 2.9 % de arcilla y 31.2 % de arena en los suelos con manejo convencional y 66.2, 2.1 y 31.7 % de limos arcillas y arena, respectivamente, para los suelos con manejo regenerativo.

Tabla 7. Caracterización fisicoquímica del suelo de pastizales ganaderos con manejo regenerativo con su respectivo control de manejo convencional. Los valores muestran el promedio ± el error estándar. Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre manejos.

	Manejo convencional	Manejo regenerativo	<i>F</i>	<i>p</i>
	<i>Control</i>	<i>Parcela 1</i>		
<i>pH</i>	6.5 ± 0.13 ^a	6.4 ± 0.11 ^a	0.10	0.751
<i>Conductividad eléctrica (dSm⁻¹)</i>	1.8 ± 0.8 ^a	1.7 ± 0.8 ^a	1.52	0.233
<i>Densidad aparente (g/cm³)</i>	1.14 ± 0.02 ^a	1.10 ± 0.03 ^a	0.004	0.984
<i>Nitrógeno total (%)</i>	0.20 ± 0.05 ^a	0.26 ± 0.04 ^a	1.27	0.273
<i>Materia orgánica (%)</i>	3.6 ± 0.11 ^b	4.12 ± 0.64 ^a	6.86	0.17
<i>Carbono total (%)</i>	1.7 ± 0.1 ^b	3.3 ± 0.4 ^a	8.58	0.009
<i>C:N</i>	10.50 ± 1.0	12.6 ± 0.12	4.4	0.05
<i>Ca²⁺</i>	0.4 ± 0.05 ^a	0.6 ± 0.16 ^a	0.69	0.416
<i>Fe²⁺</i>	2.03 ± 0.12 ^a	1.94 ± 0.06 ^a	0.490	0.493
<i>K⁺</i>	0.10 ± 0.02 ^a	0.16 ± 0.03 ^a	2.53	0.129
<i>Mg²⁺</i>	0.22 ± 0.03 ^a	0.26 ± 0.05 ^a	0.48	0.495
<i>Mn²⁺</i>	0.04 ± 0.003 ^a	0.05 ± 0.01 ^a	0.34	0.564
<i>Zn²⁺</i>	0.002 ± 0.0003 ^b	0.004 ± 0.0004 ^a	15.84	<0.001
<i>Na⁺</i>	0.064 ± 0.004 ^a	0.039 ± 0.002 ^b	8.58	<0.001

Los suelos de pastizales ganaderos de Valle Colombia presentaron suelos ligeramente salinos y moderadamente salinos, mientras que, su control tiene suelos moderadamente salinos. Por otro lado, los suelos de pastizales ganaderos con manejo regenerativo y su respectivo control presentaron suelos ligeramente salinos. El grado de salinidad no compromete el desarrollo vegetal [52]. En el caso de Valle Colombia, el suelo del control presentó un incremento del pH, mientras que en el caso del Rancho Los Robles no se encontraron diferencias significativas entre el control y el manejo regenerativo. Ambos sitios de estudio (Valle Colombia y Los Robles), presentan un pH entre 6 y 7 en las distintas parcelas muestreadas, por lo que, de acuerdo con el rango establecido por la FAO, la disponibilidad de nutrientes no se encuentra limitado para el desarrollo de las plantas [59].

El porcentaje de nitrógeno total (NT) del suelo de pastizales ganaderos con manejo convencional y en la parcela 1 de manejo holístico se consideran como altos, mientras el porcentaje de NT en la

parcela 2 con manejo holístico se considera muy alto [52]. Por otro lado, los suelos de pastizales ganaderos con manejo regenerativo tienen en promedio un porcentaje muy alto de NT y su respectivo control de manejo convencional tiene suelos con un porcentaje de NT alto [52]. El alto contenido de nitrógeno refleja el aporte del ganado por la orina y excreta como su permanencia en el suelo asociado a su incorporación por parte de la vegetación [60]. El mayor contenido de nitrógeno en suelos con manejo sostenible ha sido reportado con anterioridad [61].

Los valores de MOS de los sitios del rancho Valle Colombia, se encuentran entre 1.6 a 3.5 % que implican valores medios de MOS. Por otro lado, se consideran valores altos los porcentajes de MOS entre 3.6 y 6.0, por lo cual se considera que los sitios de manejo regenerativo junto con sus respectivo control tienen altos porcentajes de MOS [52]. Asimismo, la cantidad de MOS fue mayor en el manejo regenerativo y el manejo holístico en comparación a sus respectivos controles. El mayor contenido de MOS tiene efectos positivos sobre la productividad de las parcelas, ya que mejora la retención del agua, el ciclado de nutrientes y genera una retroalimentación positiva con la vegetación, es decir, más MOS lleva a un mejor desarrollo de la vegetación, lo cual, que produce más MOS [62].

7.4.Productividad de los pastizales ganaderos

La vegetación de pastizales ganaderos con manejo holístico fue en promedio 1.61 ton ha^{-1} , mientras que, el promedio de la vegetación de su respectivo control fue de 2.30 ton ha^{-1} . El control del manejo holístico es un área de tránsito continuo de animales, considerada una zona de castigo en la que se pastorea sin ningún control y se carece de información del tiempo de uso, por lo que se desconocen los periodos de descanso. Es posible que la exclusión del ganado en los momentos de venta del ganado sea suficiente para mantener la productividad [63]. Aún se están explorando a nivel mundial el efecto de la intensidad de manejo y los tiempos de descanso que se requieren para promover una productividad vegetal [64]. Por otro lado, se obtuvo en promedio 3 veces más productividad en los pastizales ganaderos con manejo regenerativo (3.4 ton ha^{-1}), en comparación del manejo convencional (0.4 ton ha^{-1}). El manejo regenerativo, contempla largos periodos de descanso y rota el ganado una vez que se ha consumido la vegetación. En otros estudios de pastoreo se ha demostrado que la exclusión de pastoreo y el pastoreo rotativo tiene efectos positivos en el suelo, la defoliación con estos métodos promueve el crecimiento de la biomasa vegetal y la diversidad de plantas [65], aunque aún se están afinando los modelos sobre la intensidad y tiempos

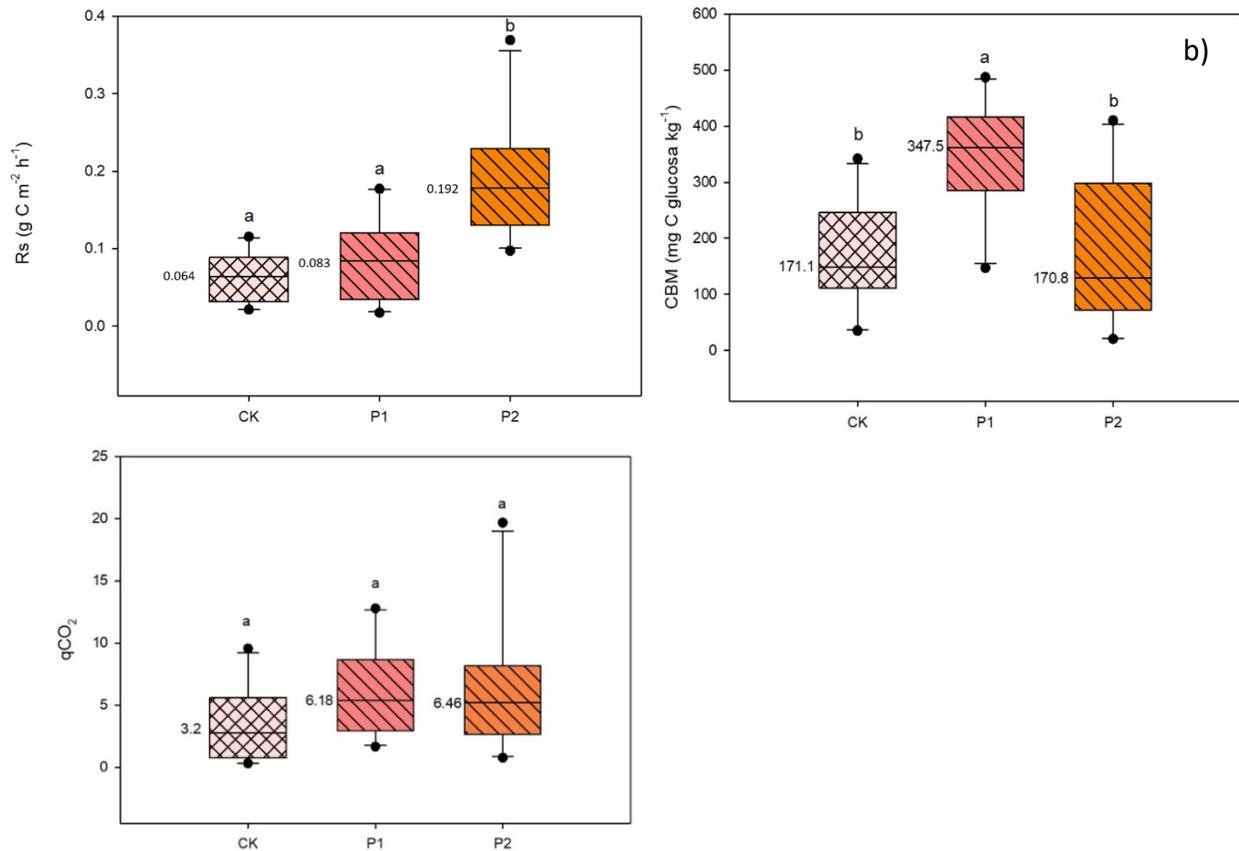
de descanso [62, 64, 66]. Además, el ganado adhiere grandes cantidades de estiércol y orina que contienen nutrientes sin digerir que llegan a las plantas y promueven su crecimiento. La vegetación que no fue consumida es pisoteada y añadida al suelo, por lo que se acorta su proceso de mineralización y las plantas obtienen los nutrientes para su crecimiento [63, 67].

7.5. Efecto del tipo de manejo de pastizales ganaderos en la actividad microbiana

La Rs de los pastizales ganaderos con manejo holístico presentó en promedio $0.137 \pm 0.02 \text{ g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. En comparación con el manejo convencional ($0.064 \pm 0.01 \text{ g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), la Rs de pastizales con manejo holístico es significativamente mayor, de acuerdo con los resultados del ANOVA de una vía ($F_{1,28} = 6.656, p < 0.05$). Individualmente, la Rs de la parcela uno (P1) con manejo holístico presentó en promedio $0.083 \pm 0.02 \text{ g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, mismo que no presentó diferencias significativas en comparación con su control (manejo convencional), mientras que, la parcela dos (P2) con un promedio de $0.192 \pm 0.02 \text{ g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ si presentó diferencias significativas en comparación con el manejo convencional de acuerdo con el ANOVA de una vía ($F_{1,28} = 14.1017, p < 0.001$) (Fig. 21a).

De igual forma, los pastizales ganaderos con el manejo regenerativo presentaron una mayor Rs ($0.195 \pm 0.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) en comparación a su respectivo control de manejo convencional ($0.053 \pm 0.01 \text{ g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), de acuerdo con los resultados del ANOVA de una vía ($F_{1,18} = 15.317, p < 0.05$) (Fig. 22a). En los suelos de pastizales ganaderos con manejo holístico el C de la biomasa microbiana fue de $259.1 \pm 32.7 \text{ mg C glucosa kg}^{-1}$, en comparación con el manejo convencional ($171.0 \pm 29.6 \text{ mg C glucosa kg}^{-1}$), no se detectaron diferencias significativas de acuerdo con el ANOVA de una vía ($F_{1,28} = 2.976, p = 0.095$). Sin embargo, el promedio de la P1 ($347.5 \pm 31.8 \text{ mg C glucosa kg}^{-1}$) fue significativamente mayor en comparación con el promedio del control de manejo convencional; no se detectaron diferencias significativas en el caso de la P2 ($170.8 \pm 29.6 \text{ mg C glucosa kg}^{-1}$) y el control, de acuerdo con el ANOVA de una vía ($F_{1,28} = 8.500, p < 0.001$) (Fig. 21b).

Por otro lado, los suelos de pastizales ganaderos con manejo regenerativo tuvieron en promedio de C en la biomasa microbiana 131.3 ± 15.1 mg C glucosa kg^{-1} , el cual fue significativamente mayor en comparación del manejo convencional (53.8 ± 5.6 mg C glucosa kg^{-1}), de acuerdo con el ANOVA de una vía ($F_{1,18} = 24.26, p < 0.001$) (Fig. 22b).



c)

Figura 21. Actividad biológica: a) Respiración del suelo b) C de la biomasa microbiana c) Cociente metabólico del suelo de pastizales ganaderos con manejo convencional (control -CK-) y manejo holístico, (P1= parcela 1, P2= parcela 2). Las dimensiones de la caja se determinan por la distancia del rango intercuartílico (entre el primer y el tercer cuartil), la línea que divide la caja representa la media. El largo de la caja dependerá de la distribución simétrica o asimétrica de los valores, mientras que, los bigotes reflejan los datos atípicos. Los puntos reflejan los datos mínimos y máximos. Las letras minúsculas, indican diferencias significativas de acuerdo con la comparación de post-hoc por la prueba de Tukey ($p < 0.05$) del ANOVA de una vía.

El cociente metabólico de los suelos de pastizales ganaderos con manejo holístico fue en promedio de 6.3 ± 1.0 g CO₂ / mg C glucosa h, y con manejo convencional fue de 3.2 ± 0.9 g CO₂ / mg C glucosa h, no se encontraron diferencias significativas entre los manejos de acuerdo con el ANOVA de una vía ($F_{1,28} = 6.656$, $p < 0.05$). Mientras que para las parcelas P1 y P2 el promedio fue de 6.18 ± 1.17 y 6.46 ± 1.80 respectivamente, no se encontraron diferencias significativas entre manejos ($F_{1,28} = 1.667$, $p = 0.207$) (Fig. 21c).

Los suelos de pastizales ganaderos con manejo regenerativo presentaron un promedio de 4.58 ± 0.89 g CO₂ / mg C glucosa h mismo que fue mayor en comparación con el promedio del manejo convencional (0.73 ± 0.12 g CO₂ / mg C glucosa h), de acuerdo con el ANOVA de una vía ($F_{1,18} = 15.317$, $p = 0.001$) (Fig. 22c).

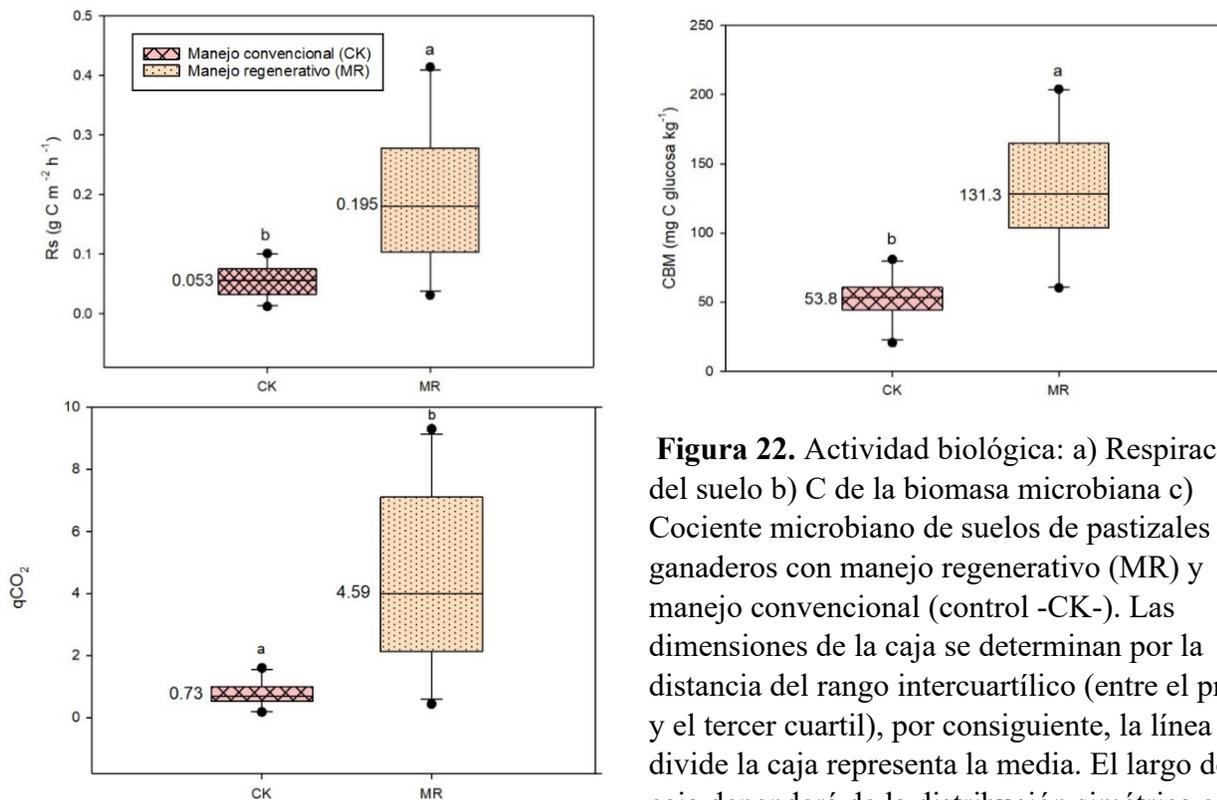


Figura 22. Actividad biológica: a) Respiración del suelo b) C de la biomasa microbiana c) Cociente microbiano de suelos de pastizales ganaderos con manejo regenerativo (MR) y manejo convencional (control -CK-). Las dimensiones de la caja se determinan por la distancia del rango intercuartílico (entre el primer y el tercer cuartil), por consiguiente, la línea que divide la caja representa la media. El largo de la caja dependerá de la distribución simétrica o

asimétrica de los valores, mientras que, los bigotes reflejan los datos atípicos. Las letras minúsculas, indican diferencias significativas de acuerdo con la comparación de post-hoc por la prueba de Tukey ($p < 0.05$) del ANOVA de una vía.

La aplicación de los manejos alternativos dio como resultado una tasa de respiración del suelo más alta, un mayor contenido de C en la biomasa microbiana, por ende, un mayor cociente metabólico, en comparación con sus respectivos controles de manejo convencional, lo cual implica que hay una mayor actividad biológica en los suelos de pastizales ganaderos con manejos alternativos. Esto se

explica porque con los manejos alternativos aplicados en los pastizales ganaderos del desierto Chihuahuense se dejan descansos adecuados en el suelo que mantienen las raíces de las plantas, así como los sustratos disponibles para el crecimiento de los microorganismos. Además, se adicionan al suelo grandes cantidades de estiércol y orina producto del propio pastoreo, que también funcionan como como sustrato para los organismos del suelo, incluidas las plantas y los microorganismos [68]. Las tasas de respiración reportadas en el presente estudio coinciden con las realizadas en pastizales del desierto Chihuahuense [69, 70], especialmente tomando en cuenta la estación del año en la que se realizaron las mediciones [71, 72].

Slaughter y colaboradores evaluaron la variabilidad de distintos parámetros de la salud del suelo en pastizales dentro del desierto Chihuahuense y encontraron un contenido de biomasa microbiana similar a la reportada en este estudio [73]. Al no utilizar pesticidas, herbicidas ni antibióticos en el ganado con manejos alternativos (holístico y regenerativo), se conserva la biomasa microbiana al no introducir estas sustancias al suelo a través de la ingesta ganadera [68]. Como consecuencia de conservar el sustrato adecuado disponible, los suelos con manejos alternativos presentan una mayor cantidad de microorganismos, por lo tanto, una mayor oportunidad de mineralización de MOS y como resultado de la alta actividad biológica hay una mayor liberación de CO₂ [28, 29]. En estudios previos se ha observado que el pastoreo de grandes herbívoros mejora la actividad metabólica microbiana del suelo, respuesta que ha sido asociada a una mayor cobertura vegetal, un mayor contenido de agua y de carbono en el suelo [66].

Yingqiu y colaboradores [74], reportaron un cociente metabólico en pastizales templados sin manejo en China de 10.07 g CO₂ / mg C glucosa h. La diferencia entre el mencionado estudio y esta investigación (3.7 g CO₂ / mg C glucosa h) fue que en el primero se utilizó el método de ácidos grasos para medir el carbono de la biomasa microbiana. Estudios en otros ecosistemas han encontrado cocientes metabólicos menores.

Chen et al (2004) [75] reportó un promedio en los pastizales de Nueva Zelanda 2.39 g CO₂ / mg C glucosa h, y Chen et al. (2001), reportaron que el cociente metabólico de un suelo en la región sur de China fue de 44.63 g CO₂ / mg C glucosa h, estos valores altos son a causa de las condiciones climáticas, relacionadas con las zonas áridas en la que se encuentra el sitio de estudio [76].

Los suelos con materia orgánica más compleja muestran un qCO₂ más bajo que los suelos con un aporte de sustrato orgánico menos complejo [76]. Los pastizales de manejo regenerativo tienen una

mayor diversidad vegetal, por lo que se esperaría un sustrato orgánico más complejo y consecuentemente, un qCO₂ más bajo (mayor eficiencia en el uso del C), pero es posible que exista una mayor cantidad de compuestos lábiles que aumentan la actividad biológica y elevan los valores de qCO₂ [31].

Por el contrario, la baja actividad biológica en el manejo convencional es producto del sobrepastoreo del ganado que no mantiene la MOS y modifica la estructura de las plantas, por lo que se reduce la cantidad de nutrientes y la permeabilidad de estos hacia las comunidades microbianas, por ende se tiene una baja respiración del suelo y actividad biológica [77].

Chen et al. (2001) también encontraron que el cambio de uso de suelo de bosque de pino a pastizal ganadero resulta en una menor eficiencia (mayor qCO₂) en la eficiencia del uso del C. Además, el cambio a sistemas más intensivos en la agricultura por tiempo prolongado acentúa esta pérdida de eficiencia en el uso del C [76].

7.6. Tasa de almacenamiento de COS en pastizales ganaderos

Se calcularon las toneladas por hectárea estimadas del COS en los pastizales ganaderos con distintos manejos estudiados (Tablas 8 y 9). Finalmente, se aplicó la ecuación 7 para obtener la tasa de almacenamiento de cada manejo.

Tabla 8. Cálculo de contenido de COS en pastizales ganaderos con manejo holístico y su respectivo control de manejo convencional.

<i>Manejo</i>	Profundidad del suelo	A	B	C	D=A*B*C	F	G=(DXF)/100
		1ha	DA	CSS	MS	CT	COS
		m ²	t m ³	m	t ha ⁻¹	%	t ha ⁻¹
<i>Holístico</i>	0-10 cm	10,000	1.05	0.1	1050	6	63
<i>Convencional</i>	0-10 cm	10,000	1.04	0.1	1040	5.9	62

A= conversión de ha a m², DA= densidad aparente CS= espesor capa superior del suelo, MS= masa del suelo en 10 cm, CT= carbono total, COS= existencias de carbono orgánico del suelo.

$$COS_{\text{almacenado con manejo holístico}} (t C ha^{-1} \text{ año}^{-1}) = \frac{(63 - 62)}{41} = 0.02$$

Tabla 9. Cálculo de contenido de COS en pastizales ganaderos con manejo regenerativo y su respectivo control de manejo convencional.

<i>Manejo</i>	Profundidad del suelo	A	B	C	D=A*B*C	F	G=(DXF)/100
		1ha	DA	CSS	MS	CT	COS
		m ²	t m ³	m	t ha ⁻¹	%	t ha ⁻¹
<i>Convencional</i>	0-10 cm	10,000	1.14	0.1	1400	1.7	19.8
<i>Regenerativo</i>	0-10 cm	10,000	1.10	0.1	1100	3.3	36.5

A= conversión de ha a m², DA= densidad aparente CS= espesor capa superior del suelo, MSS= masa del suelo en 10 cm, CT= carbono total, COS= existencias de carbono orgánico del suelo.

$$COS_{\text{almacenado con manejo regenerativo}} (t C ha^{-1} \text{ año}^{-1}) = \frac{(36.5 - 19.8)}{7} = 2.38$$

La tasa de almacenamiento de C del suelo de pastizales ganaderos con manejo holístico fue baja en el presente estudio, esto se ha justificado con que las reservas de suelo aumentan paulatinamente con estas prácticas. Sin embargo, aún se encuentra en discusión el aumento del COS, investigadores a nivel global han demostrado que los aumentos de COS con la aplicación del manejo holístico son 19-28 veces mayor, en comparación con suelos de manejo convencional. En este sentido, la capacidad del suelo de retener C está limitada por sus características físico-químicas y factores climatológicos [61], por lo que la ausencia de diferencias podría deberse a la cercanía del sitio control.

La tasa de secuestro de C de suelos de pastizales ganaderos con manejo regenerativo es casi el doble que el manejo convencional. Si bien no se ha evaluado el potencial del manejo regenerativo con todas sus prácticas, el manejo rotacional tiene un potencial de secuestro de carbono en el suelo de 10.6 t C ha⁻¹ año⁻¹, por lo que estos suelos presentaron un cuarto del potencial de secuestro del C en el suelo [60].

La aplicación del manejo regenerativo implica el aprovechamiento del estiércol como fertilizante para el suelo, además, presenta un mayor porcentaje de MOS, ambos componentes contienen C, al mantenerse en el suelo y aprovecharse, ese C se va integrando al suelo aumentando significativamente la tasa de C en comparación con el manejo convencional. Por otro lado, al tener altas densidades de ganado en los pastizales se aprovecha toda la vegetación, la que no es consumida es aplastada por las pesuñas del ganado y su integración al suelo es más rápida [16, 43].

Además, al tener una mayor productividad en los pastizales ganaderos con manejo regenerativo se tiene una mayor actividad fotosintética y por ende, mayor absorción del C de la atmósfera que será utilizado para formar la estructura de la planta [78].

7.7. Factores que afectan la actividad biológica de los suelos de pastizales ganaderos

Las condiciones climáticas promedio obtenidas al momento del muestreo en las áreas de estudio de los pastizales ganaderos con manejo holístico y su respectivo control de manejo convencional se encuentran en la Tabla 10. Mientras que, las mediciones obtenidas en campo de los pastizales ganaderos con manejo regenerativo se muestran en la Tabla 11. Estos parámetros junto con las propiedades fisicoquímicas y biológicas se correlacionaron con los indicadores de actividad biológica (respiración del suelo) y el contenido de C en el suelo.

Contrario a lo esperado, la respiración del suelo (R_s) de pastizales ganaderos con manejo convencional (control) de ambos sitios (Los Robles y Valle Colombia) no se correlacionó con ninguna característica física, química o biológica de los suelos (Tabla 12). Es posible que la R_s fue afectada por la densidad aparente. Lo anterior a causa de que la compactación del suelo modifica su estructura y por ende los espacios porosos del suelo, lo que a su vez modifica la humedad y temperatura, mismas que influyen en la actividad de las plantas y microorganismos. Como consecuencia, es posible que la pérdida de la correlación observada en los pastizales con manejo convencional puede asociarse a una pérdida en la conectividad del ecosistema, reflejando una posible alteración del ciclo del C [29, 77]. Tal como se planteó en la hipótesis, en el caso de los manejos alternativos (holístico y regenerativo), la R_s se correlacionó positivamente con la temperatura del aire (53%) y del suelo (64%), es decir una temperatura más alta en el suelo tiene como resultado una mayor liberación de CO_2 hacia la atmósfera, como ha sido ampliamente descrito [79-81].

Tabla 10. Promedio de mediciones generadas en los pastizales ganaderos con manejo holístico con su respectivo control de manejo convencional.

	Manejo convencional		Manejo holístico	
	Control	Parcela 1	Parcela 2	
T_a ($^{\circ}C$)	29.5 \pm 0.30	27.5 \pm 0.1	34.2 \pm 0.4	
H_r (%)	43.3 \pm 0.2	40.6 \pm 0.7	40.2 \pm 1.7	
T_s ($^{\circ}C$)	27.8 \pm 0.24	24.9 \pm 0.32	31.0 \pm 0.33	

<i>Hs (%)</i>	5.8 ± 0.33	8.9 ± 0.5	5.3 ± 0.7
<i>PAR (μmol/m²/s)</i>	405 ± 2	317 ± 16	716 ± 109

Los valores muestran el promedio ± el error estándar. Ta= temperatura del aire; Hr=humedad relativa; Ts= temperatura del suelo; Hs= humedad del suelo; PAR= Radiación fotosintéticamente activa.

Tabla 11. Promedio de mediciones generadas en los pastizales ganaderos con manejo regenerativo, con su respectivo control de manejo convencional.

	Manejo convencional	Manejo regenerativo
<i>Ta (°C)</i>	29.1 ± 0.70	33.7 ± 0.40
<i>Hr (%)</i>	25.3 ± 0.4	42 ± 4.9
<i>Ts (°C)</i>	28.1 ± 0.70	32.4 ± 0.41
<i>Hs (%)</i>	3.04 ± 0.87	1.81 ± 0.30
<i>PAR (μmol/m²/s)</i>	224 ± 65	1109 ± 186

Los valores muestran el promedio ± el error estándar. Ta= temperatura del aire; Hr=humedad relativa; Ts= temperatura del suelo; Hs= humedad del suelo; PAR= Radiación fotosintéticamente activa.

Además, la R_S se correlacionó positivamente en un 49% con la materia orgánica (Tabla 12), una mayor cantidad de materia orgánica tiene como resultado una mayor liberación de CO_2 . La materia orgánica funciona como un sustrato para los microorganismos, al descomponer la materia orgánica se libera CO_2 . Por ende, una mayor cantidad de MOS resulta en una mayor cantidad de alimento para los microorganismos y una mayor la liberación de CO_2 hacia la atmósfera [28, 29]. En los manejos alternativos, la conductividad eléctrica se correlacionó positivamente con un 43 % con la R_S (Tabla 12). La actividad biológica puede disminuir a causa de la salinidad y alcalinidad, por lo que, al tener suelos poco salinos en los manejos alternativos, es posible el desarrollo y crecimiento de plantas y microorganismos sin interferir en su actividad biológica. Y por ende influye positivamente en la respiración del suelo [82, 83].

Tabla 12. Correlaciones de Pearson entre la respiración del suelo y las características físicas, químicas y biológicas de suelos con distinto manejo ganadero.

Manejo convencional (controles)										Manejos alternativos (manejo holístico y manejo regenerativo)									
	Hs	Ta	Ha	pH	CE	MO	CBM	C	Rs		Hs	Ta	Hr	pH	CE	MO	CBM	C	Rs
Ts	0.40	0.83***	-0.03	0.07	-0.12	0.04	-0.05	0.07	0.26	Ts	-0.82***	0.92***	0.14	-0.59**	0.10	0.31	-0.63***	-0.24	0.53**
Hs		0.38	0.47*	0.55*	0.26	-0.01	0.25	0.44	0.01	Hs		-0.72***	-0.06	0.72***	0.03	-0.35	0.52**	0.46*	-0.36
Ta			0.22	0.18	0.10	0.15	0.16	0.33	0.30	Ta			-0.06	-0.42*	0.16	0.34	-0.67***	-0.02	0.62***
Ha				0.92***	0.60**	0.33	0.67**	0.98***	0.17	Hr				-0.03	-0.01	-0.11	0.09	-0.15	-0.07
pH					0.58**	0.14	0.64**	0.89***	0.13	pH					0.10	-0.54*	0.46*	0.59**	-0.31
CE						0.31	0.78***	0.66**	0.11	CE					0.15	0.00	0.42*	0.43*	
MO							0.12	0.35	0.07	MO							-0.18	0.13	0.49**
CBM								0.73**	0.31	CBM								0.14	-0.45*
C									0.26	C									0.29

Los efectos significativos se indican en negritas. El valor de p se indica en asteriscos: *<0.05; **<0.01; ***<0.001. Ts= temperatura del suelo (°C); Hs= humedad del suelo (%); Ta= temperatura del aire (°C); Hr=humedad relativa (%); CE= conductividad eléctrica del suelo (μscm^{-1}); MO= materia orgánica (%); CBM= carbono de la biomasa microbiana ($\text{mg C glucosa kg}^{-1}$); C= contenido de carbono en el suelo (%); Rs = respiración del suelo ($\text{g C m}^2 \text{ h}^{-1}$)

7.8. Factores que controlan la cantidad de COS de los pastizales ganaderos

Se esperaría que con un mayor contenido de arcilla en el suelo, se tendrían más cargas disponibles para la retención de MOS y por ende una mayor adhesión de C en la arcilla [19], sin embargo el presente estudio mostró que el C de los suelos de pastizales ganaderos con manejo convencional se correlacionó negativamente en un 67 % con la arcilla (Tabla 13). Lo que significa que una mayor cantidad de arcilla tiene como resultado una menor cantidad de C en el suelo, es posible que exista un cambio en la reducción de oxígeno que provocó la desorción del C, quedando disponible el C como sustrato para los microorganismos, esto a causa de una modificación en la estructura del suelo [65, 84]

Por el contrario, el pH del suelo de pastizales con manejo convencional se correlacionó positivamente con el C del suelo ($R^2= 0.89$; Tabla 13). Mientras que, el pH de los suelos de pastizales ganaderos con manejos alternativos también se correlaciono positivamente con el C del suelo en un 59% (Tabla 13). La conductividad eléctrica y el C de los suelos de pastizales con manejo convencional se correlacionaron positivamente en un 66%. Por otro lado, la conductividad eléctrica se correlacionó positivamente en un 43% en los suelos de pastizales ganaderos con manejo alternativo (Tabla 13). El contenido de carbono en el suelo afecta de manera directa tanto el pH como la conductividad eléctrica [85]. El pH afecta el almacenamiento de C en el suelo, esto a través de la composición y productividad de las plantas, así como su posterior adición al suelo como C. [86].

Distintos análisis han demostrado que la intensidad del pastoreo afecta las propiedades del suelo, un pastoreo continuo puede disminuir COS y aumentar la densidad aparente. Mientras que el pastoreo rotacional ha demostrado aumentar las tasas de COS y mantener la densidad aparente del suelo [65]. En el presente estudio, la aplicación del manejo convencional el C del suelo se correlacionó negativamente con la densidad del suelo en un 77% mientras que, para el manejo alternativo fue de 53%, Esto indica que, a mayor densidad, menor cantidad de C, los suelos con manejo convencional son más compactos al correlacionarse negativamente con 20% más que el manejo alternativo [65].

Tabla 13. Correlación de Pearson entre el contenido de C y las características físicas y químicas de suelos con distinto manejo ganadero

	Manejo convencional (controles)						Manejos alternativos (manejo holístico y manejo regenerativo)					
	Arcilla	Arena	pH	CE	DA	C	Arcilla	Arena	pH	CE	DA	C
Limo (%)	-0.61**	-0.97***	0.83***	0.46*	-0.78***	0.86***	0.23	-0.97**	0.63***	-0.08	-0.57**	0.25
Arcilla (%)		0.47*	-0.62*	-0.50*	0.85***	-0.67**		-0.26	0.13	-0.17	0.07	-0.31
Arena (%)			-0.79***	-0.45*	0.66**	-0.84***			-0.61***	0.12	0.52**	-0.19
pH				0.58**	-0.67**	0.89***				0.10	-0.33	0.59**
CE (μscm^{-1})					-0.62**	0.66**					-0.22	0.42*
DA (g/cm^3)						-0.77***						-0.53**

Efectos significativos se indican en negritas. El valor de p se indica en asteriscos: * <0.05 ; ** <0.01 ; *** <0.001 . CE= conductividad eléctrica del suelo (μscm^{-1}); DA= densidad aparente

8. Conclusiones

Con el manejo regenerativo aplicado en el rancho Los Robles, se conservan y mejoran los indicadores del suelo enfocados en el manejo sostenible, (productividad primaria, carbono orgánico del suelo y la actividad biológica del suelo) en comparación con su control de manejo de convencional. De manera similar, la aplicación del manejo holístico en el rancho Valle Colombia, aumenta la cantidad de C en los suelos, así como su actividad biológica. En ambos manejos alternativos aplicados en los pastizales ganaderos, existe una mayor actividad biológica en los suelos, que mantienen sus servicios ecosistémicos. Ambos manejos estudiados presentaron un incremento en la tasa de almacenamiento de C en el suelo.

Por lo anterior, las prácticas de manejo holístico y manejo regenerativo pueden ser consideradas como sostenibles al aumentar los indicadores productividad del suelo y aumentar el almacenamiento de C, en comparación del manejo convencional con el que fueron comparados.

La temperatura y la cantidad de sustrato son los factores que mayoritariamente están controlando la actividad biológica en los suelos de pastizales con manejos alternativos, ambos con un impacto positivo en el almacenamiento de carbono. Por el contrario, la aplicación del manejo convencional en los pastizales ganaderos del desierto Chihuahuense resulta en una mayor compactación de los suelos en comparación con los suelos con manejo convencional. Esta mayor compactación se correlacionó negativamente con el almacenamiento de carbono del suelo en los pastizales con manejo convencional extensivo.

9. Bibliografía

- [1] R. Lal, Soil health and carbon management, *Food Energy Secur.*, 5 (2016) 212-222.
- [2] Y. Teng, Z. Xu, Y. Luo, F. Reverchon, How do persistent organic pollutants be coupled with biogeochemical cycles of carbon and nutrients in terrestrial ecosystems under global climate change?, *J. Soils Sediments*, 12 (2012) 411-419.
- [3] R. Lal, Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security, *BioScience*, 60 (2010) 708-721.
- [4] J. Sarukhán, *Capital natural y bienestar social*, CONABIO, México DF: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2006, pp. 71.
- [5] J. Guzmán Aranda, J. Hoth, H. Berlanga, Comisión para la Cooperación Ambiental, Plan maestro de la alianza regional para la conservación de los pastizales del Desierto Chihuahuense, Montreal, 2012. pp. 64.
- [6] J. Hoth, Buenas prácticas ganaderas en México/Beneficial Livestock Management Practices in Mexico, Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA). Montreal. Pp, 2012, pp. 30.
- [7] C.E. LaCanne, J.G.J. Lundgren, Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably, *PeerJ.*, 6 (2018) e4428.
- [8] Pasticultores del desierto A.C., Sobre nosotros, <http://www.pasticultoresdeldesierto.com/our-story.html>. descargado de la red 28 de agosto 2021.
- [9] FAO-ITPS, Protocol for the assessment of Sustainable Soil Management, Rome, Italy, 2019, pp. 24.
- [10] Y. Yan, J. Wang, D. Tian, Y. Luo, X. Xue, F. Peng, J.-S. He, L. Liu, L. Jiang, X. Wang, Y. Wang, L. Song, S. Niu, Sustained increases in soil respiration accompany increased carbon input under long-term warming across global grasslands, *Geoderma*, 428 (2022) 116157.
- [11] B.A. Needelman, What are soils, *Nature Education Knowledge*, 4 (2013) 2
- [12] M. López-Acevedo Reguerin, R.M. Poch Claret, J. Porta Casanellas, *Edafología: uso y protección de suelos*, Mundi-Prensa Libros, Madrid, España, 2019, pp. 613.
- [13] K. Adhikari, A.E. Hartemink, Linking soils to ecosystem services—A global review, *Geoderma*, 262 (2016) 101-111.
- [14] G.R. Groshans, E. Mikhailova, C. Post, M. Schlautman, Accounting for soil inorganic carbon in the ecosystem services framework for United Nations sustainable development goals, *Geoderma*, 324 (2018) 37-46.

- [15] R. Lal, Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *J Sci.*, 304 (2004) 1623-1627.
- [16] J.J. Fuhrmann, D.A. Zuberer, 13 - Carbon transformations and soil organic matter formation, in: T.J. Gentry, J.J. Fuhrmann, D.A. Zuberer (Eds.) *Principles and Applications of Soil Microbiology* (Third Edition), Elsevier, 2021, pp. 327-361.
- [17] FAO, *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, Roma, Italia, 2017, pp. 90.
- [18] W. Yu, W. Huang, S.R. Weintraub-Leff, S.J. Hall, Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils?, *Soil Biol. Biochem.*, 172 (2022) 108756.
- [19] M.R. Islam, B. Singh, F.A. Dijkstra, Stabilisation of soil organic matter: interactions between clay and microbes, *Biogeochemistry*, 160 (2022) 145-158.
- [20] D. Kane, L. Solutions, Carbon sequestration potential on agricultural lands: a review of current science and available practices, National Sustainable Agriculture Coalition Breakthrough Strategies Solutions, LLC, 2015, pp. 1-35.
- [21] M. Wiesmeier, L. Urbanski, E. Hobbey, B. Lang, M. von Lützw, E. Marin-Spiotta, B. van Wesemael, E. Rabot, M. Ließ, N. Garcia-Franco, Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales, *Geoderma*, 333 (2019) 149-162.
- [22] A. Cueva, C.A. Robles Zazueta, J. Garatuza Payan, E.A. Yépez, Soil respiration in Mexico: Advances and future directions, *J Terra Latinoam*, 34 (2016) 253-269.
- [23] J.Ö.G. Jónsson, B. Davíðsdóttir, E.M. Jónsdóttir, S.M. Kristinsdóttir, K.V. Ragnarsdóttir, Soil indicators for sustainable development: A transdisciplinary approach for indicator development using expert stakeholders, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 232 (2016) 179-189.
- [24] J. Lehmann, D.A. Bossio, I. Kögel-Knabner, M.C. Rillig, The concept and future prospects of soil health, *Nat. Rev. Earth & Environ.*, 1 (2020) 544-553.
- [25] D.J. Eldridge, M. Delgado-Baquerizo, S.K. Travers, J. Val, I. Oliver, Do grazing intensity and herbivore type affect soil health? Insights from a semi-arid productivity gradient, *J. Appl. Ecol.*, 54 (2017) 976-985.
- [26] S.C.B. Bertini, L.C.B. Azevedo, Chapter 3 - Soil microbe contributions in the regulation of the global carbon cycle, in: A. Kumar, J. Singh, L.F.R. Ferreira (Eds.) *Microbiome Under Changing Climate*, Woodhead Publishing, 2022, pp. 69-84.

- [27] A. Miltner, P. Bombach, B. Schmidt-Brücken, M. Kästner, SOM genesis: microbial biomass as a significant source, *Biogeochemistry*, 111 (2012) 41-55.
- [28] S.S. Bhattacharyya, G.H. Ros, K. Furtak, H.M.N. Iqbal, R. Parra-Saldívar, Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics, *Sci. Total Environ.*, 815 (2022) 152928..
- [29] C.L. Phillips, N. Nickerson, Soil Respiration, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, *Elsevier*, (2015) 1-15.
- [30] J.E. Paolini Gómez, Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos, *Terra Latinoam.*, 36 (2018) 13-22.
- [31] Y.J. Pardo-Plaza, J.E. Paolini Gómez, M.E. Cantero-Guevara, D. Científica, Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café, *U.D.C.A* 22 (2019).
- [32] P. Manzano, R. List, Grasslands of Mexico: A perspective on their conservation (Los pastizales del norte de Mexico: Una perspectiva para su conservacion), In: Basurto, Xavier; Hadley, Diana, eds. 2006. Grasslands ecosystems, endangered species, and sustainable ranching in the Mexico-US borderlands: Conference proceedings. RMRS-P-40. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006, pp. 43-47.
- [33] SEMARNAT, Ecosistemas Terrestres, Gobierno de México, <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap2.html> descargado de la red 16 de agosto 2021.
- [34] E. Rubio, E. Pérez, Desarrollo de la ganadería en el estado de Chihuahua 2000-2011: Líneas de trabajo para un estudio del impacto ambiental, *Chihuahua Hoy*, 9 (2012) 271-292.
- [35] Se espera un comportamiento favorable para el sector pecuario mexicano durante 2022, Gobierno de México 2022 <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/se-espera-un-comportamiento-favorable-para-el-sector-pecuario-mexicano-durante-2022?idiom=es>, descargado de la red el 28 de noviembre del 2022
- [36] M.E. Ritchie, Grazing management, forage production and soil carbon dynamics, *Resources*, 9 (2020) 49.
- [37] T. Gebregergs, Z.K. Tessema, N. Solomon, E. Birhane, evolution, Carbon sequestration and soil restoration potential of grazing lands under exclosure management in a semi-arid environment of northern Ethiopia, *Ecol. Evol.*, 9 (2019) 6468-6479.

- [38] P.L. Greenwood, Review: An overview of beef production from pasture and feedlot globally, as demand for beef and the need for sustainable practices increase, *Animal*, 15 (2021) 100295.
- [39] M.A. Meehan, K.K. Sedivec, J.L. Printz, F.A. Brummer, Determining carrying capacity and stocking rates for range and pasture in North Dakota, NDSU Extension, North Dakota State University, 2018.
- [40] Z. Ma, B.M. Shrestha, E.W. Bork, S.X. Chang, C.N. Carlyle, T.F. Döbert, L.S. Sobrinho, M.S. Boyce, Soil greenhouse gas emissions and grazing management in northern temperate grasslands, *Sci. Total Environ.*, 796 (2021) 148975.
- [41] M. Nordborg, Holistic management—a critical review of Allan Savory’s grazing method, in: E. Rööös (Ed.), *SLU/EPOK – Centre for Organic Food & Farming & Chalmers*, Uppsala, Suecia, 2016, pp. 46.
- [42] L. Schreefel, R. Schulte, I. de Boer, A.P. Schrijver, H. van Zanten, Regenerative agriculture—the soil is the base, *Glob. Food Sec.*, 26 (2020) 100404.
- [43] H. Gosnell, N. Gill, M. Voyer, Transformational adaptation on the farm: processes of change and persistence in transitions to ‘climate-smart’ regenerative agriculture, *Glob. Environ. Change*, 59 (2019) 101965.
- [44] K.K. Zaralis, S. Padel, Effects of High Stocking Grazing Density of Diverse Swards on Forage Production, Animal Performance and Soil Organic Matter: A Case Study, in: A. Theodoridis A. Ragkos M. Salampasis (Ed.) *International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food & Environment*, Springer, Chania, Crete Greece, 2017, pp. 131-146.
- [45] K. Helming, K. Daedlow, B. Hansjürgens, T. Koellner, Assessment and governance of sustainable soil management, *Sustainability*, 10 (2018) 4432.
- [46] R. Lal, Soil conservation and ecosystem services, *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 2 (2014) 36-47.
- [47] FAO, A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol, Rome, Italy, 2020, pp. 140.
- [48] INEGI, Edafología, , <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Mapa> descargado de la red: 22 de agosto 2022.
- [49] D.M. Arias, M.V.H.P. Roldan, M.U. Vélez, Uso del índice normalizado de vegetación para la elaboración de planos de cultivo, *Opuntia Brava*, 11 (2019) 261-265.

- [50] B. Sobhani, B. Abad, O.M.K. Motlagh., Identification of vegetation coverage seasons in Iran using enhanced vegetation index (EVI), *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 16 (4) (2018) 3861-3872.
- [51] FAO, ¿How to take a soil sample?, <http://www.fao.org/3/ca1543en/ca1543en.pdf>, pp. Infografía descargada de la red 25 de agosto 2021.
- [52] NOM-021-SEMARNAT-2000., Norma Oficial Mexicana número 021 de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales., <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. descargada de la red 18 de agosto 2021
- [53] EGM-5 Analyzer., Operation Manual Version 1.06., PP Systems, http://ppsystems.com/download/technical_manuals/80109-1-EGM-5_Operation_V106.pdf, 2018 descargado de la red 21 de agosto 2021.
- [54] E. Gregorich, G. Wen, R. Voroney, R. Kachanoski, Calibration of a rapid direct chloroform extraction method for measuring soil microbial biomass C, *Soil Biol, Biochem.*, 22 (1990) 1009-1011.
- [55] FAO, GLOSOLAN (Global Soil Laboratory Network): Standard operation procedure for total carbon. Dumas Dry combustion method, 2019, pp. 10.
- [56] M. Salehi, O.H. Beni, H.B. Harchegani, I.E. Borujeni, H.J.P. Motaghian, Refining soil organic matter determination by loss-on-ignition, *Pedosphere*, 21 (2011) 473-482.
- [57] D. Villaseñor Ortiz, Fundamentos y procedimientos para análisis físicos y morfológicos del suelo, Machala: Universidad Técnica de Machala, Ecuador, Machala: Universidad Técnica de Machala, 2016, pp. 77.
- [58] E.D. Vance, P.C. Brookes, D.S. Jenkinson, An extraction method for measuring soil microbial biomass C, *Soil biology and Biochemistry*, 19 (1987) 703-707.
- [59] FAO, Que es el pH del suelo Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, <https://www.fao.org/3/ca7162es/ca7162es.pdf> Infografía descargada de la red el 15 de octubre del 2022.
- [60] Y. Bai, M.F. Cotrufo, Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions, *Science*, 377 (2022) 603-608.
- [61] H.J. Hawkins, Z.S. Venter, M.D. Cramer, A holistic view of Holistic Management: What do farm-scale, carbon, and social studies tell us?, *Agric. Ecosyst. & Environ.*, 323 (2022) 107702.

- [62] C. Poeplau, Grassland soil organic carbon stocks along management intensity and warming gradients, *Grass Forage Sci.*, 76 (2021) 186-195.
- [63] Y. Li, S. Dong, Q. Gao, Y. Zhang, S. Liu, H. Ganjurjav, G. Hu, X. Wang, Y. Yan, H. Wu, X. Gao, S. Li, J. Zhang, Rotational grazing promotes grassland aboveground plant biomass and its temporal stability under changing weather conditions on the Qinghai-Tibetan plateau, *Land Degrad. Dev.*, 31 (2020) 2662-2671.
- [64] L. Ma, J.D. Derner, R.D. Harmel, J. Tatarko, A.D. Moore, C.A. Rotz, D.J. Augustine, R.B. Boone, M.B. Coughenour, P.C. Beukes, Application of grazing land models in ecosystem management: Current status and next frontiers, *Adv. Agron.*, 158 (2019) 173-215.
- [65] R.C. Byrnes, D.J. Eastburn, K.W. Tate, L.M. Roche, A Global Meta-Analysis of Grazing Impacts on Soil Health Indicators, *J. Environ. Qual.*, 47 (2018) 758-765.
- [66] T. Qu, W. Guo, C. Yang, J. Zhang, Y. Yang, D. Wang, Grazing by large herbivores improves soil microbial metabolic activity in a meadow steppe, *Grassl. Sci.*, 67 (2021) 30-40.
- [67] S.E. McDonald, R. Lawrence, L. Kendall, R. Rader, Ecological, biophysical and production effects of incorporating rest into grazing regimes: A global meta-analysis, *J. Appl. Ecol.*, 56 (2019) 2723-2731.
- [68] R. Teague, U. Kreuter, Managing grazing to restore soil health, Ecosystem Function, and Ecosystem Services, *Front. Sustain. Food Syst.* 4 (2020) 157.
- [69] B.O. Campuzano EF, Larsen J, Guillen-Cruz G, Fernández-Luqueño F, Flores-Rentería D, Procedimiento para evaluar la degradación biológica del suelo en zonas áridas del noreste de México. , *Real Datos Espacio*, 13 (2022) 38-57.
- [70] J. Delgado-Balbuena, J.T. Arredondo, H.W. Loescher, L.F. Pineda-Martínez, J.N. Carbajal, R. Vargas, Seasonal Precipitation Legacy Effects Determine the Carbon Balance of a Semiarid Grassland, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 124 (2019) 987-1000.
- [71] E.F. Campuzano-Granados, J. Delgado-Balbuena, D.Y. Flores-Rentería, Controlling factors of ecosystem and soil respiration in a xeric shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico, *Terra latinoam.*, 39 (2021) e1251.
- [72] F.-R. Dulce, J. Delgado-Balbuena, E.F. Campuzano, J.C. Yuste, Seasonal controlling factors of CO₂ exchange in a semiarid shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico, *Sci. Total Environ.*, 858 (2022) 159918.

- [73] L. Slaughter, S. Deb, S. Chakraborty, B. Li, N. Bakr, B. Edwards, D. Weindorf, On-farm evaluation of regenerative land-use practices in a semi-arid pasture agroecosystem in West Texas, USA, *Rev. Bras. Cienc. Solo.*, 45 (2021).
- [74] Y. Cao, L. Xu, Z. Zhang, Z. Chen, N. He, Soil Microbial Metabolic Quotient in Inner Mongolian Grasslands: Patterns and Influence Factors, *Chin. Geogr. Sci.*, 29 (2019) 1001-1010.
- [75] C.R. Chen, L.M. Condrón, M.R. Davis, R.R. Sherlock, Effects of plant species on microbial biomass phosphorus and phosphatase activity in a range of grassland soils, *Biol. Fertil. Soils*, 40 (2004) 313-322
- [76] G. Chen, L. Gan, S. Wang, Y. Wu, G. Wan, A comparative study on the microbiological characteristics of soils under different land—use conditions from karst areas of southwest China, *Chin. J. Geochem.*, 20 (2001) 52-58.
- [77] J. Li, Y. Huang, F. Xu, L. Wu, D. Chen, Y. Bai, Responses of growing-season soil respiration to water and nitrogen addition as affected by grazing intensity, *Func. Ecol.*, 32 (2018) 1890-1901.
- [78] M.M. K. Phukubye, N. Buthelezi, P. Muchaonyerwa, C. Cerri, V. Chaplot,, On the impact of grassland management on soil carbon stocks: a worldwide meta-analysis, *Geoderma*, 28 (2022) e00479.
- [79] W. Wang, X. Chen, X. Li, J. Qian, J. Yu, Temperature dependence of soil respiration in arid region is reconciled, in: F. Sun, H. Liu, D. Hu (Eds.) *Cognitive Systems and Signal Processing*, Springer Singapore, Singapore, 2019, pp. 350-358.
- [80] X. Jia, Y. Mu, T. Zha, B. Wang, S. Qin, Y. Tian, Seasonal and interannual variations in ecosystem respiration in relation to temperature, moisture, and productivity in a temperate semi-arid shrubland, *Sci. of The Total Environ.*, 709 (2020) 136210.
- [81] M.L. Vargas-Terminel, D. Flores-Rentería, Z.M. Sánchez-Mejía, N.E. Rojas-Robles, M. Sandoval-Aguilar, B. Chávez-Vergara, A. Robles-Morua, J. Garatuza-Payan, E.A. Yépez, Soil respiration is influenced by seasonality, forest succession and contrasting biophysical controls in a tropical dry forest in northwestern Mexico, *Soil Syst.*, 6 (4) (2022) 75.
- [82] J. Xie, Y. Li, C. Zhai, C. Li, Z. Lan, CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle, *Environ. Geol.*, 56 (2009) 953-961.
- [83] L. Lai, X. Zhao, L. Jiang, Y. Wang, L. Luo, Y. Zheng, X. Chen, G.M. Rimmington, Soil respiration in different agricultural and natural ecosystems in an arid region, *Plos One.*, (2012) e48011.

[84] J.M. Lavallee, J.L. Soong, M.F. Cotrufo, Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century, *Glob. Chang. Biol.*, 26 (2020) 261-273..

[85] C. Vos, A. Don, E.U. Hobbey, R. Prietz, A. Heidkamp, A. Freibauer, Factors controlling the variation in organic carbon stocks in agricultural soils of Germany, *Eur. J. Soil Sci.* 70 (2019) 550-564.

[86] J. Zhang, X. Wu, Y. Shi, C. Jin, Y. Yang, X. Wei, C. Mu, J. Wang, A slight increase in soil pH benefits soil organic carbon and nitrogen storage in a semi-arid grassland, *Ecol. Indic.*, 130 (2021) 108037.