

Efectos de la herbivoría en las propiedades microbiológicas y bioquímicas del suelo de la Sierra de Cazorla

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencias Ambientales 2023/2024

Autor:

Javier Nadal Fuentes

Tutor:

Jorge Mataix Solera

Cotutor:

Evan Alexander Netherton Marks

COIR:

TFG.GCA.JM.JNF.231113

Facultad:

Ciencias Experimentales

Departamento:

Agroquímica y Medio Ambiente

Área de conocimiento:

Edafología y Química Agrícola



FACULTAD DE CIENCIAS
EXPERIMENTALES

UNIVERSITAS
Miguel Hernández



CIENCIAS AMBIENTALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

UNIVERSITAS
Miguel Hernández



GETECMA

Grupo de Edafología y Tecnologías
del Medio Ambiente
UNIVERSITAS
Miguel Hernández



Resumen

El pastoreo extensivo es una práctica ancestral que ha moldeado los paisajes mediterráneos, ha contribuido al aumento de la biodiversidad y a la productividad vegetal. En este estudio nos centraremos en los efectos del pastoreo sobre las propiedades microbiológicas y bioquímicas del suelo en los Campos de Hernán Perea, situados en el Parque Natural de la Sierra de Cazorla, Segura y las Villas. Para ello se tomaron datos de diferentes zonas con distintas intensidades de pastoreo: sin herbivoría (usadas como controles), baja, media y alta. Los análisis se centraron en los siguientes parámetros: el carbono orgánico oxidable (CO), la biomasa microbiana del suelo (CBM), la respiración edáfica basal (REB), el cociente metabólico (qCO_2) y las actividades de las enzimas β -glucosidasa, ureasa y fosfatasa. Los resultados obtenidos muestran cómo el pastoreo, con las distintas intensidades estudiadas, mejora las propiedades del suelo analizadas y contribuye al secuestro de carbono.

Palabras clave: pastoreo, biomasa microbiana del suelo, carbono orgánico, actividades enzimáticas.



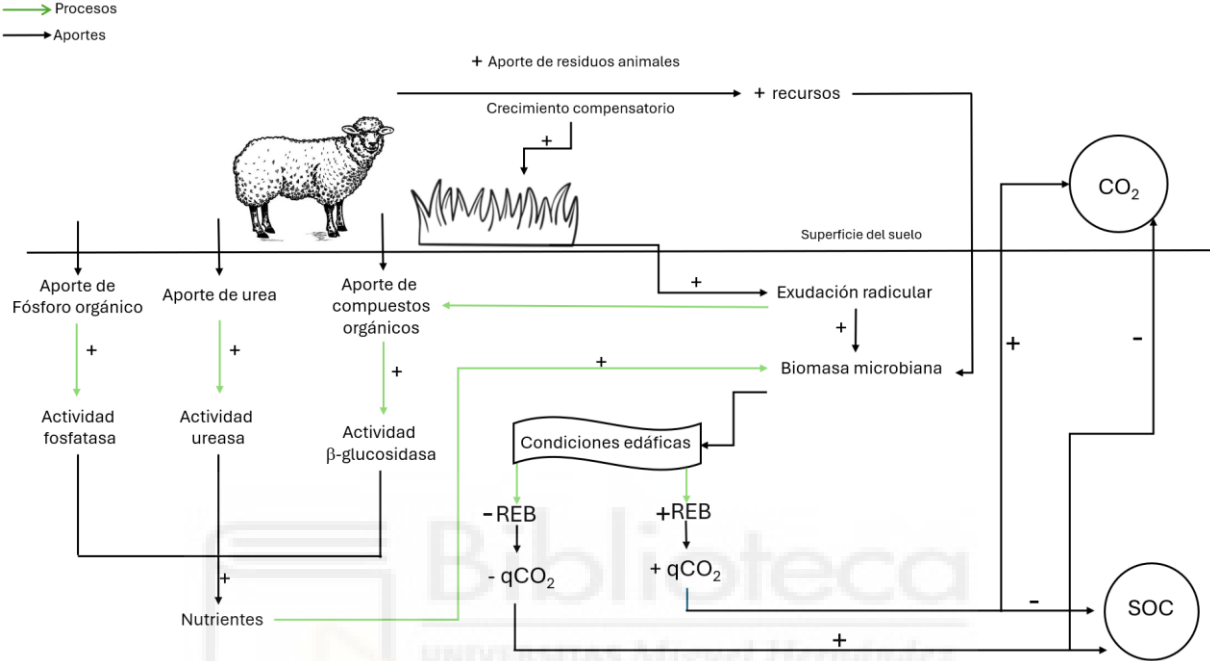
Abstract

Extensive grazing is an ancestral practice that has shaped Mediterranean landscapes and has contributed to increases in biodiversity and plant productivity. In this study we will focus on the effects of grazing on the microbiological and biochemical properties of the soil in the Campos de Hernán Perea, located in the Sierra de Cazorla Natural Park. For this purpose, data were collected from different areas with different grazing intensities: no grazing (used as controls), low, medium and high. The analyses were focused on the following parameters: oxidizable organic carbon (OC), soil microbial biomass (MBC), basal soil respiration (BR), metabolic quotient (qCO_2) and the activities of the enzymes β -glucosidase, urease and phosphatase. The results obtained show how grazing, at the intensities studied, improves the soil properties analyzed and contributes to carbon sequestration.

Keywords: Grazing, soil microbial biomass, organic carbon, enzymatic activities.



Resumen gráfico



Agradecimientos

Quiero empezar dando las gracias al profesor Jorge Mataix Solera por abrirme las puertas al mundo de la Edafología con su enseñanza, y transmitirme su pasión por esta ciencia. Espero que en mi futuro pueda seguir explorando y contribuyendo a esta disciplina con el mismo entusiasmo y compromiso que él me ha compartido, a lo largo de la carrera y como tutor de mi trabajo de Final de Grado.

Mi agradecimiento lo hago extensivo a Evan Alexander Netherton Marks, cotutor de mi TFG; por su confianza, sus consejos y su inestimable ayuda. Evan me ha brindado todas las facilidades para llevar a cabo este trabajo.

En estas líneas de agradecimiento quiero hacer una mención especial a Victoria Arcenegui Baldó, por haberme acompañado a lo largo del trabajo, por sus consejos y lecciones que me llevo conmigo, para mi futuro.

A Luis Daniel Olivares Martínez y Dario Ferrati por haberme acompañado en el laboratorio.

Agradezco al Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente de la UMH, por permitirme trabajar y compartir momentos tanto dentro como fuera del aula, y ampliar mi formación.

Y este viaje no habría sido lo mismo sin David, Andrea, Ángela, Carlos, José Luis, Claudio, Mario, Nicolás y Sofía. Muchas gracias por compartirlo conmigo.

Finalizo con unas líneas de agradecimiento hacia quienes me apoyan siempre en lo que hago y me aconsejan. A mis padres y a mi hermano.

A Teresa, por acompañarme siempre.

Índice

Resumen.....	3
Abstract.....	4
Resumen gráfico	5
Agradecimientos.....	6
1. Introducción.....	8
2. Antecedentes y objetivos.....	10
3. Materiales y métodos	11
3.1. Descripción de la zona de estudio.....	11
3.2. Diseño experimental	15
3.3. Análisis de laboratorio.....	17
3.4. Análisis estadístico	19
4. Resultados	20
4.1. Carbono orgánico oxidable (CO).....	21
4.2. Carbono de la biomasa microbiana (CBM).....	22
4.3. Respiración edáfica basal (REB).....	23
4.4. Relación entre el CBM y el CO	24
4.5. Cociente metabólico (qCO_2).....	25
4.6. Actividades enzimáticas.....	26
4.6.1. Actividad de la enzima β -glucosidasa.....	26
4.6.2. Actividad de la enzima ureasa.....	27
4.6.3. Actividad de la enzima fosfatasa	28
5. Discusión	29
6. Conclusiones.....	31
7. Proyección futura	32
8. Bibliografía	33
9. Anexo: Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	37

1. Introducción:

El pastoreo es una práctica que se remonta más allá de 10.000 años, cuando se domestica los primeros animales para el uso ganadero. Ha moldeado el paisaje en aquellas zonas que han desarrollado esta actividad, aumentando la diversidad de vegetación y creando un paisaje en mosaico (Metera et al., 2010). Muchos de los paisajes de la región mediterránea han evolucionado con el pastoreo, creando una relación entre la actividad humana y el medio ambiente. El matorral mediterráneo presenta una alta resiliencia y, si la población de herbívoros no es muy alta, los ecosistemas se ven beneficiados por esta práctica: aumenta la diversidad de vegetación y la productividad (Blondel, 2006).

La actividad ganadera supone una fuente de ingresos para las regiones que históricamente han practicado la ganadería, gracias a la obtención de leche, lana u otros recursos. También ha supuesto un estilo de vida para muchas personas en estas regiones, que ha permitido mantener tradiciones y ha fomentado la cohesión social. (FAO, 2024)

Podemos encontrar dos grandes grupos cuando nos referimos a la ganadería: la ganadería intensiva y la ganadería extensiva. La primera es un tipo de actividad donde el ganado es criado en condiciones artificiales con el objetivo de maximizar la producción, mientras que la segunda busca unas condiciones más naturales para el rebaño. Dentro de la ganadería extensiva existen distintas prácticas como el pastoreo trashumante o rebaños situados en grandes extensiones, aunque la zona esté cercada.

El uso del pastoreo extensivo tiene efectos en la calidad del suelo, término que engloba el conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas (Marks et al. 2024). Cuando se habla de “salud” del suelo, muchas veces se hace referencia a la parte biótica (Anderson et al., 2003), aunque hay autores que usan los términos “calidad” y “salud” del suelo como sinónimos (Doran y Safley, 1997). La salud del suelo hace referencia a la capacidad de un suelo para sostener el ecosistema: la parte vegetal y animal (USDA-NTCS, 2012). Los microorganismos y otra biota (invertebrados) trabajan en la descomposición de la materia orgánica, mejorando la estructura del suelo, que favorece, entre otros, la retención hídrica. Regulan también los ciclos de nutrientes, y por tanto influyen en la fertilidad del suelo (Jacoby, 2017). Los microorganismos son fundamentales para mantener la salud del suelo, e indican la capacidad que tiene para llevar a cabo reacciones biogeoquímicas (Nannipieri et al. 2018).

El suelo se ve afectado cuando se alcanza el sobrepastoreo (Soussana y Lemaire, 2014), es decir, un exceso de carga en un lugar determinado que provoca la disminución de la cubierta vegetal y con ello un mayor grado de erosión, la disminución de la capacidad de retención hídrica del mismo y pérdida de la materia orgánica. Además, supone un

impacto en las propiedades físicas del suelo como es la estructura; en las propiedades químicas: conductividad eléctrica, el pH o capacidad de intercambio catiónico; y en las propiedades biológicas (Conant y Paustian, 2002).

El ganado en zonas de pastos, como es el lugar en el que se realiza el estudio, lleva a cabo una defoliación de las plantas (Metera et al. 2010). Esto puede suponer un problema si el rebaño es demasiado grande o si el mismo permanece de forma permanente en el mismo lugar ya que no permite a la planta que se recupere. Sin embargo, si el rebaño es trashumante y no presenta una alta densidad, puede jugar un papel fundamental en el retorno de carbono. Los animales, además de alimentarse, también devuelven biomasa en sus heces que supone un retorno de entre un 50 y un 70% de la biomasa ingerida (Gillmulina et al. 2020). Este aporte de carbono (además del aporte en sí de este elemento en las heces) también mejora la calidad del suelo, permite un mayor crecimiento de la vegetación y un aumento de las reservas de carbono del mismo (Lal, 2004), lo que reduce el CO₂ atmosférico y ayuda a hacer frente al cambio climático (Lal et al., 2021)

El presente trabajo analiza el efecto del pastoreo sobre propiedades microbiológicas y bioquímicas del suelo. En particular, se analiza el efecto en los siguientes parámetros: carbono orgánico oxidable (CO) del suelo, carbono de la biomasa microbiana (CBM), respiración edáfica basal (REB), el cociente metabólico (qCO_2), la relación CBM/CO y la actividad de tres enzimas: ureasa, β -glucosidasa y la fosfatasa.

El *carbono orgánico oxidable* hace referencia a la fracción de carbono orgánico del suelo que puede ser oxidada por los microorganismos. Su análisis es importante para tener una visión de la disponibilidad de nutrientes en el suelo a largo plazo (Duval et al., 2018). El *carbono de la biomasa microbiana* representa la cantidad de carbono que hay en el suelo perteneciente a la comunidad microbiana. Esta biomasa microbiana participa en la descomposición de la materia orgánica y por tanto en el ciclo de nutrientes (Zhou et al., 2017). La *respiración edáfica basal* también nos indica el estado de la comunidad de microorganismos puesto que mide la actividad metabólica de los microorganismos del suelo (Zhou et al., 2017). Con estos dos últimos parámetros podemos calcular el *cociente metabólico* (qCO_2) que nos indica la eficiencia en el uso del carbono por parte de los microorganismos. Cuanto más alto es este cociente, menos eficientes son los microorganismos en el uso del carbono orgánico, lo que indica que la comunidad está expuesta a un mayor estrés.

Por último, estudiamos las *actividades enzimáticas* que se relacionan con los procesos biológicos del suelo. Nos permite obtener información sobre el estado del mismo y el impacto que pueden tener las actividades antropogénicas (Nannipieri et al., 2018). Las

enzimas del suelo juegan un papel fundamental en las reacciones químicas de transformación de compuestos orgánicos y actúan en el ciclo de nutrientes como el nitrógeno, el fósforo o el azufre.

La investigación sobre el impacto del pastoreo en las propiedades del suelo es de suma importancia puesto que afecta a la dinámica de nutrientes y a su fertilidad, repercutiendo en la salud de los ecosistemas y en la productividad agrícola. Además, el conocimiento de los efectos del pastoreo permite llevar a cabo prácticas de manejo sostenible del suelo para poder conservarlo, aumentar la resiliencia de los ecosistemas y mitigar el efecto del cambio climático.

2. Antecedentes y objetivos

Este estudio pertenece a un proyecto (Adaptación al clima, sostenibilidad y desarrollo tecnológico en sistemas agroganaderos extensivos. VegClimApp, Referencia: AGROALNEXT/ 2022/038) liderado por el Área de Ecología de la Universidad Miguel Hernández de Elche. El Área de Edafología de la UMH se ha encargado del estudio de los efectos en el suelo. En 2024, se publicó un artículo (Marks et al., 2024) en el que se estudiaron los efectos que los ungulados provocan en las propiedades del suelo y la estabilización del carbono orgánico en una zona de pastizales en la que se lleva a cabo pastoreo frente a una zona de bosque repoblado, en la Sierra de Cazorla.

En el presente trabajo nos centraremos solo en la zona de pastoreo de los Campos de Hernán Perea, comparando con cercados que tomamos como controles, las propiedades microbiológicas y bioquímicas del suelo en función de las intensidades del pastoreo.

El objetivo principal del trabajo es analizar si la intensidad del pastoreo tiene efectos sobre las propiedades microbiológicas y bioquímicas del suelo.

3. Materiales y métodos

3.1. Descripción de la zona de estudio:

La zona de estudio está ubicada al sudeste de la península ibérica en el Parque Natural de la Sierra de Cazorla, Segura y las Villas, en la provincia de Jaén, Andalucía ($38^{\circ}05'00''\text{N } 2^{\circ}45'00''\text{O}$) (*Figura 1*). El lugar fue utilizado como explotación maderera durante las décadas de 1940 y 1950 hasta que se declaró zona protegida en el año 1986, momento en el que se designan dos zonas dentro del parque: una primera dedicada a la ganadería extensiva (trashumante y sedentaria); y una segunda zona en la que queda prohibido realizar este tipo de actividades. El parque cuenta con distintas figuras de protección como son Z.E.P.A. (zona de especial protección para aves), L.I.C. (lugar de importancia comunitaria) y Z.E.C. (zona de especial conservación), además de tener la figura de reserva de la biosfera por la UNESCO desde el año 1983.

La zona de estudio que ha sido seleccionada se encuentra en los Campos de Hernán Perea (*Figura 2*) en el norte del parque. En ella encontramos pastos en los que hay rebaños sedentarios de ovejas y de vacas, pero también rebaños trashumantes que llegan en los meses de mayo y junio, y permanecen hasta el mes de noviembre. Para el estudio se realizó el seguimiento de 9 rebaños trashumantes de ovejas.



Figura 1: Localización de la Sierra de Cazorla

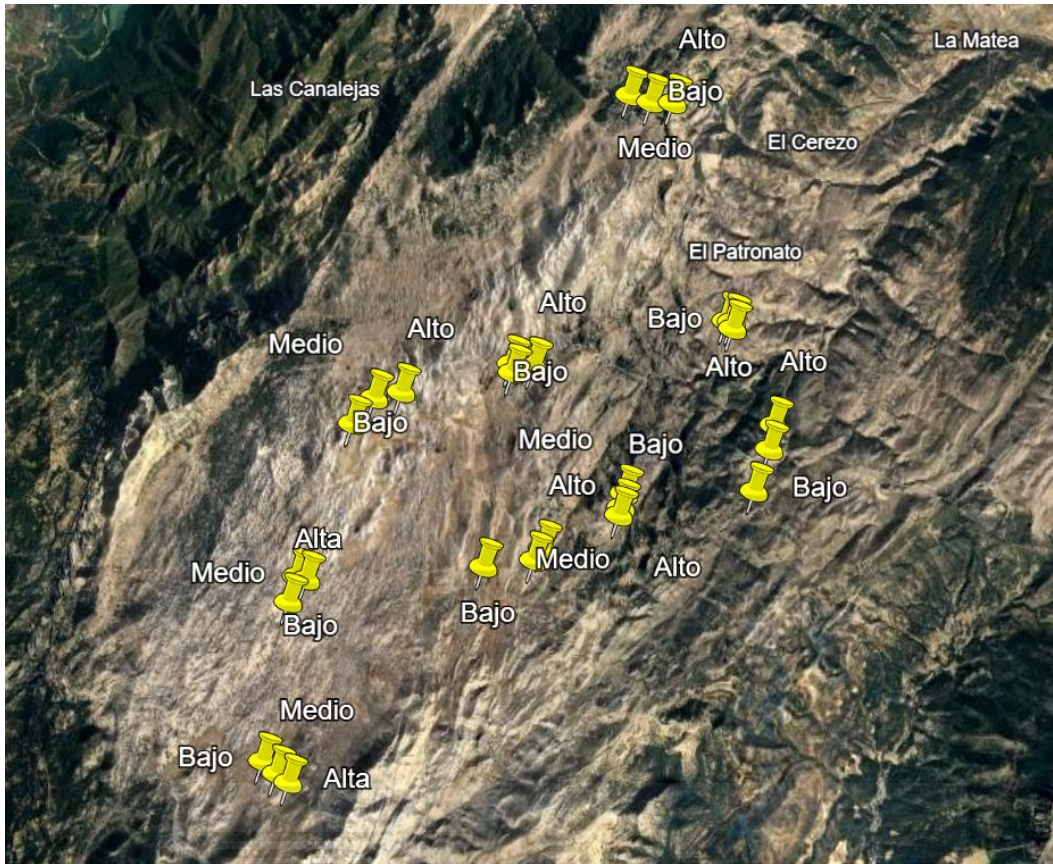


Figura 2: Localización de los puntos de muestreo en los Campos de Hernán Perea para la primera clasificación de datos.

La fauna herbívora en los Campos de Hernán Perea incluye ganado y animales silvestres. El ganado está compuesto por un 90% de ovejas y en menor medida cabras, bovinos y caballos. Entre los animales silvestres, encontramos jabalíes (*Sus scrofa*), muflones (*Ovis orientalis musimon*), gamos (*Dama dama*), ciervos (*Cervus elaphus*) y cabras montesas (*Capra pirenaica*).

La vegetación que se encuentra en la Sierra de Cazorla está formada por pinares de pino carrasco (*Pinus halepensis*), pino negral (*Pinus pinaster*) y pino salgareño (*Pinus nigra*); mientras que, en los Campos de Hernán Perea, debido a la climatología, predominan piornos, enebro común y espino albar, y gramíneas: rompesacos (*Aegilops geniculata*), aragüeñas (*Aegilops triuncialis*) y las barbas de macho (*Bromus hordeaceus*).

El parque cuenta con tres termotipos distintos: supramediterráneo, oromediterráneo y el mesomediterráneo, siendo este último el que más extensión abarca. Las precipitaciones medias anuales oscilan entre 300 y 1600 mm dependiendo de la zona del parque, y la temperatura media anual entre los 12°C y los 16°C. (AEMET, 2024)

En cuanto a la geología, el parque se sitúa en la zona prebética de la cordillera bética. En esta zona, predominan materiales de origen sedimentario con formación durante el Mesozoico; abundan materiales carbonatados como calizas y dolomías. En la zona más alta hay planicies cubiertas por praderas.

Aunque podemos encontrar diferentes tipos de suelo, como Leptosoles, Regosoles, Cambisoles y Fluvisoles, predominan los suelos jóvenes, poco evolucionados como Leptosoles y Regosoles según la WRB (IUSS, 2015). Se describe a continuación algunas de las características de estos grupos de suelos:

- Leptosoles: Son suelos poco profundos; el contacto con la roca es a menos de 30 cm. Son pedregosos y comunes en zonas montañosas.
- Regosoles: Son suelos minerales poco desarrollados sobre materiales no consolidados. Son comunes en áreas montañosas. En la zona de estudio encontramos regosoles calcáreos.
- Cambisoles: Son suelos poco desarrollados, pero que presentan al menos la diferenciación de un horizonte subsuperficial que se evidencia gracias a la formación de estructura, la coloración parda y el contenido en arcilla o en un incremento de carbonatos secundarios.
- Fluvisoles: Son suelos jóvenes, poco desarrollados sobre materiales fluviales.
- Luvisoles: Suelos desarrollados en zonas con pendientes bajas y con climas en los que hay una estación seca y otra húmeda muy definidas. Presentan acumulación de arcillas. Tiene tonalidades rojas por la presencia de óxidos de hierro.

En algunas zonas mejor preservadas y orientación de umbría podemos encontrar suelos con un horizonte A, oscuro debido a un mayor contenido de materia orgánica (corresponderían a Phaeozems y Kastanozems)

En la *Soil Taxonomy* estos suelos se clasificarían como: Entisol, Inceptisol, Mollisol y Alfisol (SSS, 2022). Es importante destacar que estos son los suelos que podemos encontrar en el Parque Natural; pero en nuestra zona de estudio predominan los Entisoles.

- Entisoles: Son suelos jóvenes con muy poca o ninguna evidencia de desarrollo de horizontes diagnóstico. No presentan horizontes genéticos, a excepción de un horizonte A. En la zona de estudio podemos encontrar perfiles AC, AR (Horizonte A en contacto directo con la roca) y ACR. Corresponden a los Leptosoles, Regosoles y Fluvisoles en la WRB. Lo más dominante en nuestra zona serían los Lithic Xerorthents.
 - Xerorthents: Entisoles que se encuentran en superficies erosionadas recientemente. Esta erosión puede ser natural o antrópica. No presenta ninguna característica especial dentro de los Entisoles (Orthents). Además, se encuentran bajo un régimen de humedad xérico (Xerorthents). Este régimen de humedad se caracteriza por inviernos fríos y húmedos, y veranos cálidos con sequías prolongadas. La falta de agua ocurre durante el periodo de verano y las lluvias se producen durante el otoño.
 - Lithic Xerorthent: Xerorthents que tienen contacto lítico a menos de 50 cm de la superficie del suelo, aunque suele ser a menos de 25 cm de la superficie. Son suelos que normalmente se usan para el pastoreo.
- Inceptisoles: Corresponderían a los Cambisoles descritos anteriormente para la WRB.
- Mollisoles: Corresponderían a los Phaeozems y Kastanozems descritos anteriormente para la WRB, Xeroll o Udoll dependiendo del régimen de humedad.
- Alfisolos: Corresponderían a Luvisoles descritos anteriormente en la WRB. A nivel de suborden Xeralfs por el régimen de humedad de la zona y como Grupo los haploxeralfs.



Figura 3: Imagen de la zona de muestreo situada en los Campos de Hernán Perea.

3.2. Diseño experimental:

El estudio se realizó en los Campos de Hernán Perea (*Figura 2 y 3*).

Para realizar el muestreo se hizo el seguimiento a 9 rebaños; estos rebaños se encontraban distribuido en diferentes zonas en los Campos de Hernán Perea. Esta clasificación se hizo en un primer momento con las observaciones en campo, fijándonos en aquellas zonas en las que había rebaño y estimando de forma visual la intensidad del pastoreo. En cada una de las zonas donde se situaban los animales se establecieron tres categorías según la intensidad: baja, media y alta. Una vez establecidas las categorías, se tomaron 3 muestras de cada una de las zonas con distintas intensidades de forma que por cada zona se recogieron un total de 9 muestras. Al final del muestreo se obtuvieron 81

muestras, 27 de cada categoría. Para los controles se tomaron 12 muestras en los lugares cercados, donde no podía entrar ningún rebaño.

A continuación, se realizó una reclasificación a partir de nuevos mapas y de trabajos posteriores a la toma de muestras que detallan con más precisión las intensidades. Para la reclasificación se contactó con los ganaderos de 15 rebaños, se les facilitaron collares de transmisión GPS y se hizo un seguimiento de estos rebaños durante un año. Con los datos obtenidos se hicieron mapas que presentaban la probabilidad de que los rebaños estuviesen en una zona determinada.

Finalmente, al reclasificar se obtuvieron 12 muestras controles, 45 muestras de intensidades bajas, 27 de intensidad media y 9 muestras de intensidad alta.

La toma de muestras se realizó con cilindros metálicos de 100 cm³ (5 cm de diámetro y 5 cm de profundidad). Como indicábamos, los suelos en los Campos de Hernán Perea son suelos poco profundos que presentan un único horizonte edáfico es por ello que las muestras que se han cogido pueden considerarse superficiales, y hemos estudiado sus 5 primeros cm (*Figura 4*).



Figura 4: Imagen del procedimiento para tomar una muestra de suelo.

3.3. Análisis de laboratorio:

De las muestras recogidas en campo se analizaron los siguientes parámetros:

El *carbono orgánico oxidable* del suelo, determinado mediante la oxidación con dicromato potásico en medio ácido, según el método de Walkley-Black (1934). Esta técnica se va a dejar de utilizar por la alta toxicidad que presenta el dicromato potásico. Sin embargo, presenta varios aspectos por los que interesa usar el método: el dicromato oxida de forma selectiva el carbono orgánico, por tanto, se puede medir de forma específica el carbono orgánico oxidable sin tener interferencias con otros compuestos. Por otro lado, permite cuantificar cantidades muy bajas de este tipo de carbono lo que supone una gran ventaja para suelos que tengan un bajo contenido de carbono orgánico oxidable.

Existen alternativas como la combustión húmeda con peróxido de hidrógeno aunque presenta problemas debido a la oxidación incompleta de la materia orgánica; la reacción dependerá del tipo de suelo (Arévalo et al., 2023). Otra alternativa es la del método de pérdidas por ignición (PPI), que consiste en la calcinación de la materia orgánica a 455°C para medir la cantidad de sólidos volátiles asociados a la materia orgánica.

La técnica usada para medir *respiración edáfica basal* (REB) consiste en llevar la muestra de suelo, previamente pesado en un vial, a capacidad de campo con agua destilada y se somete a una incubación durante una hora. En este tiempo los microorganismos del suelo respirarán, liberando CO₂. Transcurrido este tiempo, el vial con el suelo se introduce en uno más grande con una disolución de KOH al 2%, que va a reaccionar con el CO₂ liberado por los microorganismos. Posteriormente, mediante un respirómetro (Bac-Trac 4200 Microbiological Analyser, Sylab, Austria) que mide los cambios de impedancia en la disolución de KOH se cuantifica el CO₂.

El carbono de la biomasa microbiana (CBM) se ha medido por el método de fumigación-extracción (Vance et al., 1987). Se realiza exponiendo una muestra de suelo a cloroformo, causando la disrupción de las membranas celulares de los microorganismos que estén en el suelo. El carbono de las células muertas se liberará al medio y con una disolución extractora (K₂SO₄) se obtiene el carbono liberado, que se determina por espectrofotometría a una longitud de onda de 590 nm. Después se compara el carbono obtenido en la misma muestra sin fumigar.

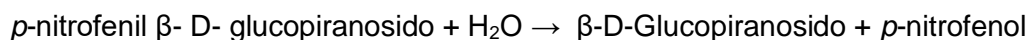
Con los dos parámetros mencionadas anteriormente (REB y CBM), podemos calcular el *cociente metabólico* ($q\text{CO}_2$) para cada una de las muestras analizadas, lo que nos ayudará a conocer la eficiencia de los microorganismos en el uso del carbono orgánico (Anderson y Domsch, 1993), cuanto más alto es este coeficiente indica menor eficiencia.

También se ha calculado el cociente entre el carbono de la biomasa microbiana (CBM) y el carbono orgánico oxidable, que representa la proporción de carbono orgánico que hay en la biomasa microbiana del suelo.

Las *actividades enzimáticas* se utilizan como indicadores de calidad del suelo. Estos indicadores son una herramienta que nos informa de las propiedades, procesos y características del suelo (Astier-Calderón et al., 2002).

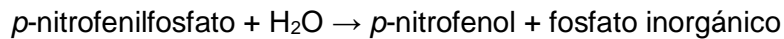
Las enzimas del suelo provienen de diversas fuentes: de los microorganismos del suelo y de los invertebrados. Las enzimas pueden ser secretadas por estos organismos o por hongos o bien por lisis celular después de su muerte (Nannipieri, 2018). La función de las enzimas es catalizar las reacciones químicas relacionadas con el ciclo de nutrientes. Por tanto, la actividad enzimática nos indica la capacidad que tiene el suelo para llevar a cabo estas reacciones bioquímicas.

La enzima β -glucosidasa interviene en el ciclo del carbono actuando en la hidrólisis de los enlaces β -glucosídicos de las grandes cadenas de carbohidratos. Juega un papel fundamental en la obtención de energía para los microorganismos del suelo (Eivazi y Zakariah, 1993). El método usado para la determinación de la actividad de la β -glucosidasa es el descrito por Tabatabai (1982). El principio en el que se basa esta técnica es la determinación colorimétrica del *p*-nitrofenol obtenida tras la acción de la β -glucosidasa al incubar la muestra con el sustrato β -D-glucopiranosido a pH 6. Se incuba la muestra a 37°C durante una hora, se centrifuga los tubos con las muestras y se extrae el sobrenadante que contiene el producto que se va a medir. A este extracto se le añade una disolución de CaCl_2 y el tampón THAM, a pH 12. La lectura en el espectrofotómetro se realiza a 400 nm. La reacción que se produce en este ensayo es la siguiente:

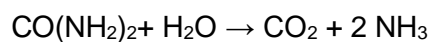


La enzima fosfatasa cataliza la transformación del fósforo orgánico a inorgánico, de forma que esté en una forma asimilable para las plantas. La actividad de la enzima fosfatasa se ha medido siguiendo el método de Tabatabai y Bremer (1969) mediante la adición de un sustrato artificial a nuestra muestra, en este caso el *p*-nitrofenil fosfato; se determina el *p*-nitrofenol fosfato liberado tras la incubación de las muestras durante una hora a 37°C usando un espectrofotómetro, midiendo a 400 nm. El *p*-nitrofenol formado, en

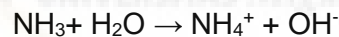
medio básico, adquiere una coloración amarillenta. La reacción que se produce en el ensayo es la siguiente:



Por último, se ha determinado la actividad de la enzima ureasa. Ésta interviene en el ciclo del nitrógeno, catalizando la hidrólisis de la urea:



Para medir la actividad de esta enzima se ha usado el método de Tabatabai y Bremer (1972), modificado por Nannipieri *et al.* (1980). El análisis se basa en la determinación del amonio liberado tras incubar con urea la muestra a 37°C durante 90 minutos. El NH_4^+ se determina por espectrofotometría a una longitud de onda de 660 nm.



3.4. Análisis estadístico:

Para realizar el análisis estadístico se utilizó el programa R (R Core Team 2023), con los pasos siguientes:

En primer lugar, se realizaron los histogramas para ver cómo se distribuían los datos. En los parámetros se veía claramente que la distribución no era normal; se hizo un test no paramétrico, el de Kruskal-Wallis. Cuando el histograma mostró una posible distribución normal, se realizó el ANOVA seguido del test de Shapiro-Wilk aplicado a los residuos para comprobar si realmente era una distribución normal o no. Si el test indicaba que la distribución no era normal entonces se realizaba el test de Kruskal-Wallis; de lo contrario se continuaba con el ANOVA. Ambos tests, nos indican si existen diferencias entre las muestras ($P < 0,05$) pero no entre cuáles hay diferencias.

Para analizar entre qué intensidades había diferencia se usaron dos tests de comparaciones múltiples: test de Tukey para los parámetros que presentaban una distribución normal, y la prueba Dunn-Bonferroni en las muestras que no presentaban esta distribución.

4. Resultados

A continuación se muestran gráficamente los resultados obtenidos.

En todos los parámetros que se han estudiado, el resultado de las pruebas globales han sido significativos ($P < 0,05$, tanto en los test ANOVA como en los de Kruskal-Wallis). Esto indica que en todos los parámetros analizados existen diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de intensidad de pastoreo estudiados por lo que se ha procedido a realizar los análisis Post-hoc de Tukey y Dunn-Bonferroni.

En las figuras, las letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas, a $P < 0,05$ entre intensidades de pastoreo. Las siglas g.l. significan grados de libertad.

El gráfico de cajas y bigotes está compuesto por diferentes partes (*figura 5*): la línea situada en el interior de la caja representa la mediana, el borde superior e inferior de la caja representan los cuartiles 3 y 1 respectivamente (Q3 y Q1), la caja en su conjunto representa el nivel intercuartilico (IQR), los extremos que representan los “bigotes” (L.S. y L.I.) son los valores límites calculados de la siguiente forma: $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ para el límite inferior y $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ para el límite superior. Por último, los círculos son valores atípicos, que son aquellos valores inferiores a $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ o superiores a $Q3 + 1,5 \cdot IQR$.

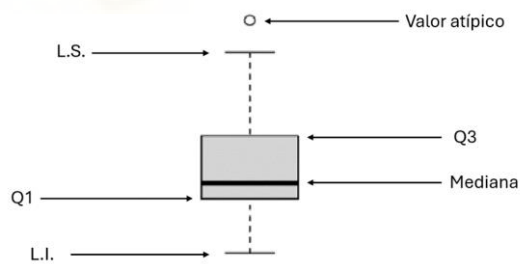


Figura 5: Ejemplo de un gráfico de cajas y bigotes

4.1. Carbono orgánico oxidable (CO)

En la *Figura 6* podemos ver el porcentaje de carbono orgánico oxidable según las diferentes intensidades del pastoreo.

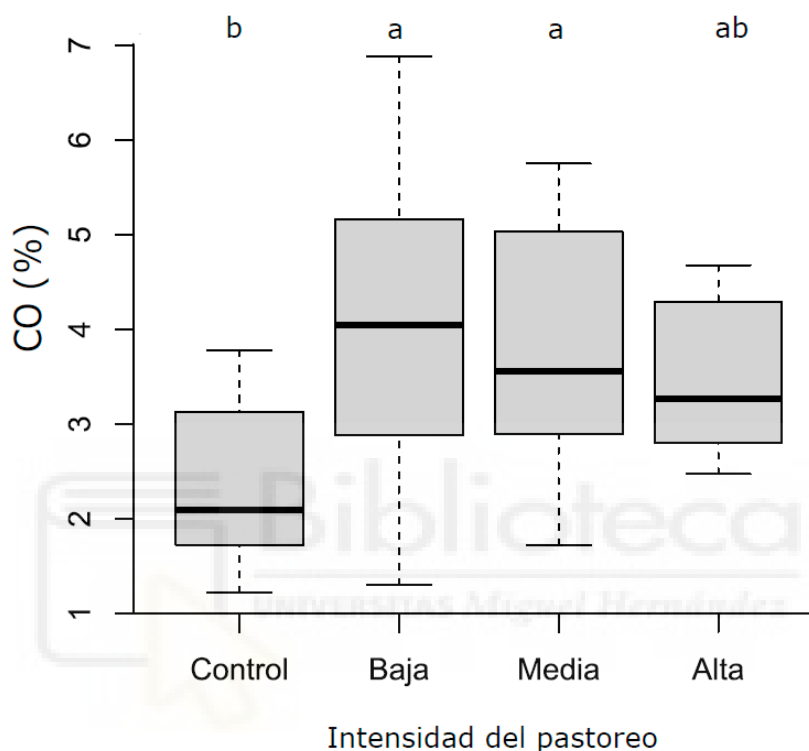


Figura 6: Porcentaje de carbono orgánico oxidable para cada intensidad de pastoreo. Los resultados del ANOVA son: $F=5,632$; $p\text{-valor}=0,001$ g.l.=3.

Se observa un aumento del carbono orgánico oxidable en aquellos lugares en los que ha habido pastoreo en comparación con los controles. En el caso de las intensidades bajas y medias, el aumento es estadísticamente significativo ($p < 0,05$), mientras que, para las intensidades altas, a pesar de que hay un ligero aumento, este no es significativo. Además, si nos fijamos, se observa cómo el carbono orgánico es ligeramente superior para intensidades bajas, mostrando una tendencia a descender conforme aumenta la intensidad del pastoreo.

4.2. Carbono de la biomasa microbiana (CBM)

En la *Figura 7* se muestra el carbono de la biomasa microbiana (CBM) según la intensidad del pastoreo.

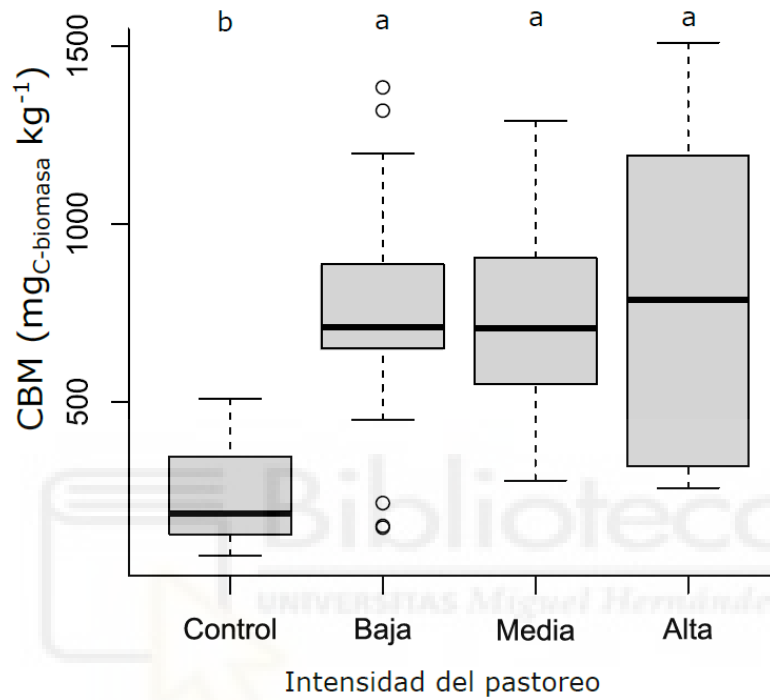


Figura 7: CBM según la intensidad del pastoreo. El eje de ordenadas representa los mg C_{bm} kg⁻¹. Los resultados del ANOVA son: $F=12,88$; $p\text{-valor}<0,001$, $g.l.=3$.

Se observa cómo se produce un aumento significativo ($p<0,05$) del CBM en las tres intensidades frente a los controles. Además, entre las tres intensidades no existen diferencias significativas, si bien hay más variabilidad en los datos de intensidades altas.

4.3. Respiración edáfica basal (REB)

La *Figura 8* muestra a la REB y según las intensidades de los rebaños.

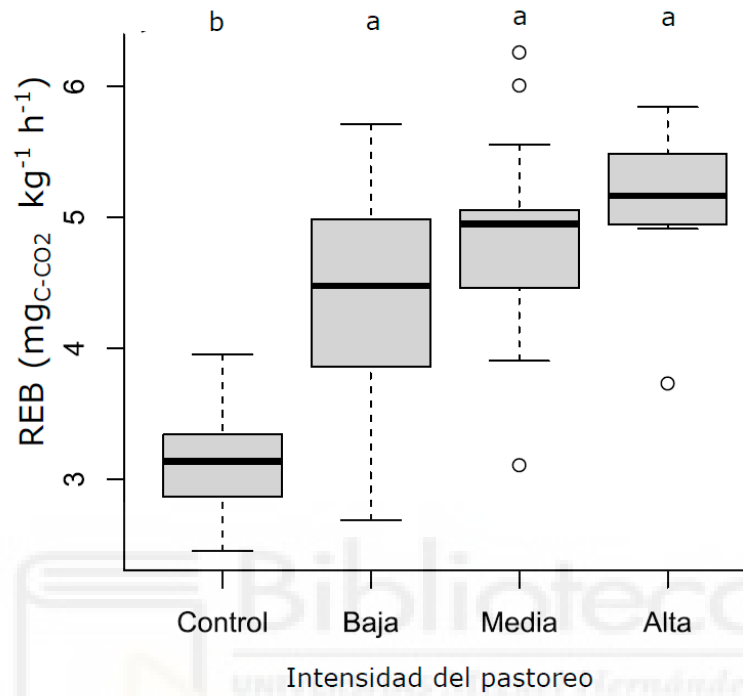


Figura 8: REB según la intensidad del pastoreo. El eje de ordenadas representa los mg_{C-CO2} kg⁻¹ h⁻¹. Los resultados del test de Kruskal-Wallis son: $\chi^2=26,611$; p -valor $<0,001$; $g.l.=3$.

Se puede observar como la REB media aumenta con la intensidad del pastoreo. Este aumento es estadísticamente significativo ($p<0,05$) en las tres clases de intensidades respecto a los controles. La REB muestra una tendencia a aumentar con la intensidad, sin embargo, las diferencias entre ellas no son significativas.

4.4. Relación entre el CBM y el CO

La *Figura 9* expresa la relación entre el CBM y el CO frente a la intensidad de pastoreo.

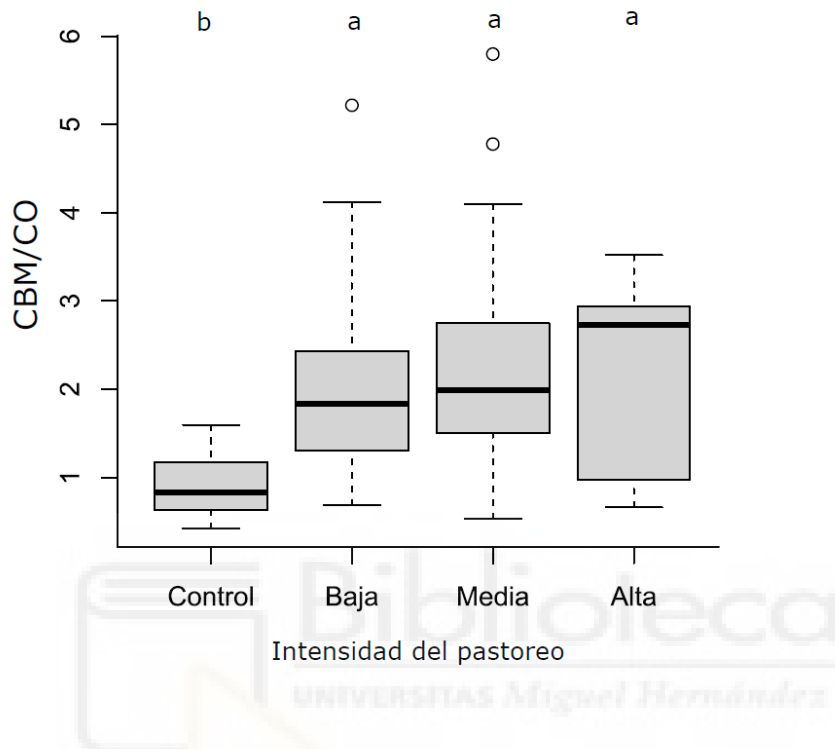


Figura 9: Relación entre el CBM y el CO según la intensidad del pastoreo. Los resultados del test de Kruskal-Wallis son: $X^2=20,693$; p -valor $<0,001$; $g.l.=3$.

Las diferencias entre las distintas intensidades de pastoreo y los controles son estadísticamente significativas.

Existe una ligera tendencia al alza para el cociente de CBM y CO cuanto mayor es la intensidad, aunque esta diferencia no es estadísticamente significativa entre intensidades.

4.5. Cociente metabólico (qCO_2)

La *Figura 10* representa el cociente metabólico, que es la relación entre la respiración edáfica basal y el carbono de la biomasa microbiana.

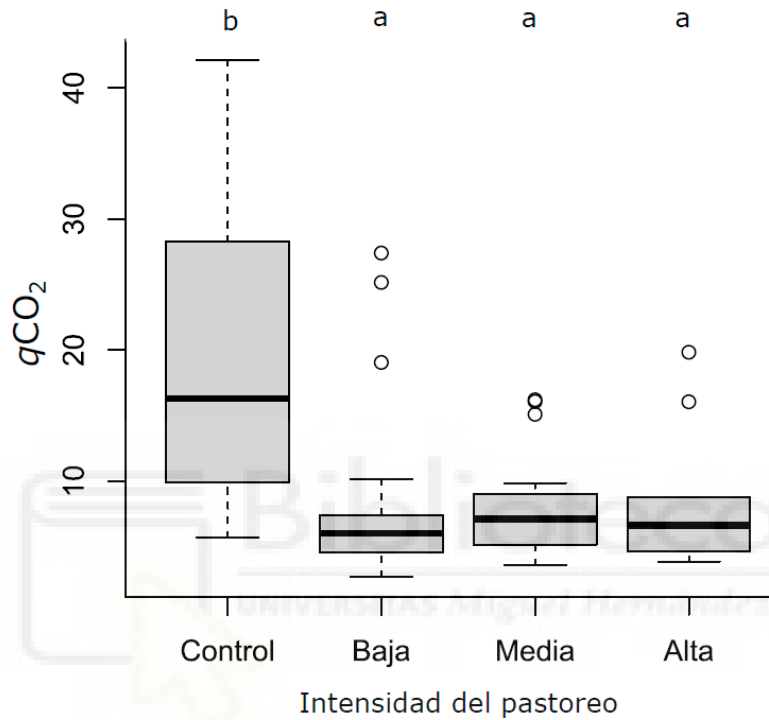


Figura 10: Cociente metabólico según la intensidad del pastoreo. El eje de ordenadas representa el cociente metabólico. Los resultados del test de Kruskal-Wallis son: $X^2=16,81$; p -valor $<0,001$; $g.l.=3$.

Los controles difieren estadísticamente de aquellas zonas en las que ha habido algún tipo de pastoreo, siendo superior en las parcelas marcadas como controles.

4.6. Actividades enzimáticas

4.6.1. Actividad de la enzima β -glucosidasa

La siguiente figura (Figura 11) muestra la diferencia de la actividad de la enzima β -glucosidasa dependiendo de la intensidad del pastoreo.

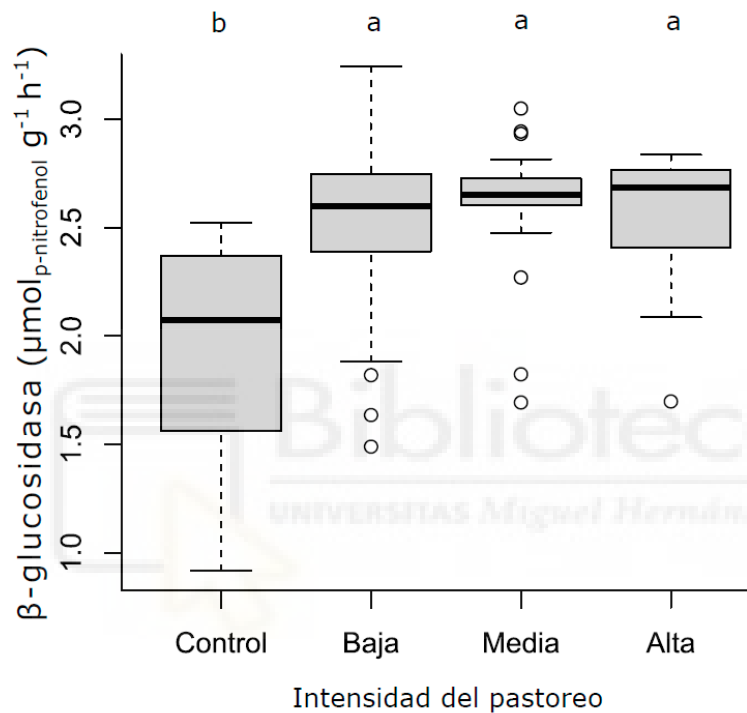


Figura 11: Actividad de la enzima β -glucosidasa según la intensidad del pastoreo. El eje de ordenadas representa los $\mu\text{moles de p-nitrofenol g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Los resultados del test de Kruskal-Wallis son: $X^2=19,957$; p -valor $<0,001$; $g.l.=3$

Tras el análisis estadístico, podemos decir que existen diferencias significativas entre los controles y los otros niveles de intensidad, siendo estas últimas las que mayor actividad tienen de la enzima estudiada. Por otro lado, no existen diferencias entre las intensidades de pastoreo.

4.6.2. Actividad de la enzima ureasa

La *Figura 12* muestra la relación entre la actividad de la enzima ureasa frente a la intensidad de la herbivoría.

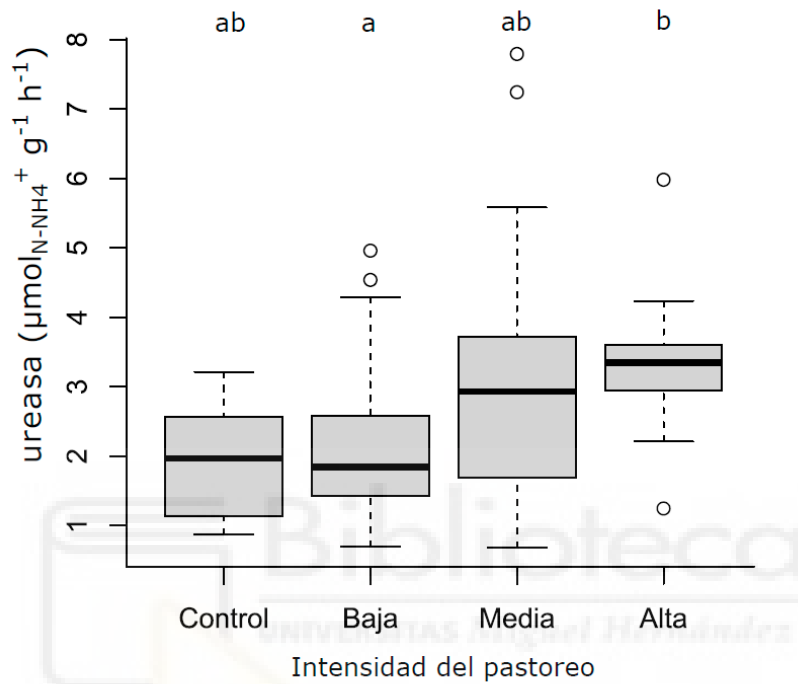


Figura 12: Actividad de la enzima ureasa según la intensidad del pastoreo. El eje de ordenadas representa los $\mu\text{moles de N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Los resultados del test de Kruskal-Wallis son: $X^2=9,8672$; $p\text{-valor}=0,020$; $g.l.=3$.

Se observa una tendencia al aumento de la actividad de la enzima ureasa cuanto mayor es la intensidad del pastoreo. Entre los controles, intensidad baja y media no hay diferencias significativas, ni tampoco entre la intensidad media y la intensidad alta; sin embargo, sí que hay diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre la intensidad alta y la baja.

4.6.3. Actividad de la enzima fosfatasa

La *Figura 13* representa la actividad de la enzima fosfatasa según la intensidad del pastoreo.

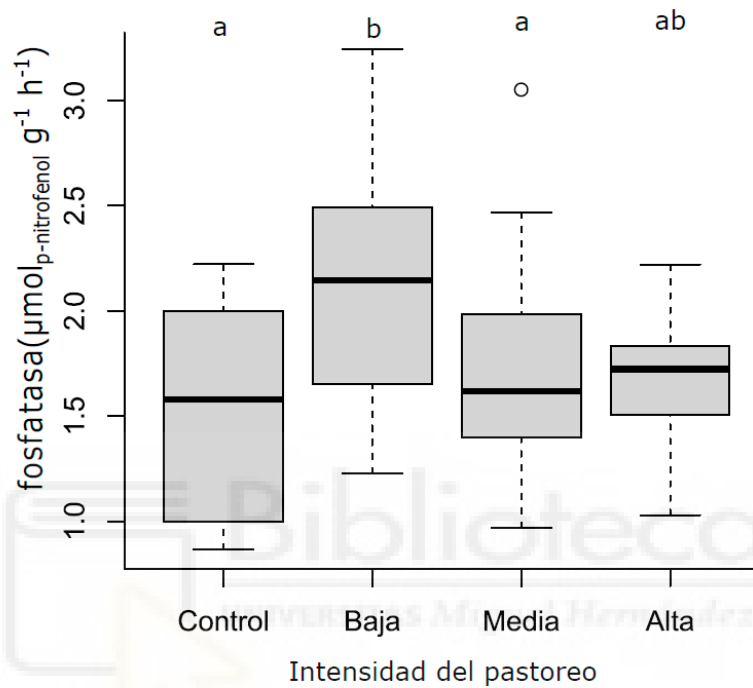


Figura 13: Actividad de la enzima fosfatasa según la intensidad del pastoreo. El eje de ordenadas representa los $\mu\text{moles de p-nitrofenol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Los resultados del ANOVA son: $F=6,362$; $p\text{-valor} < 0,001$; $g.l.=3$.

En la gráfica podemos observar que, para la intensidad baja, la actividad de la enzima es superior al resto. Después del análisis estadístico se ha podido determinar que existen diferencias significativas entre la intensidad baja y los controles, y también entre la baja y la media.

5. Discusión

Los resultados obtenidos tras el análisis de las muestras en el laboratorio muestran como aquellas áreas en las que ha habido actividad ganadera presentan diferencias en la mayoría de los parámetros estudiados frente a las parcelas control, sin pastoreo. En la mayoría de los casos los valores tienen una tendencia a aumentar con la presencia de rebaños, menos en el caso del cociente metabólico, que es muy superior en el caso de las parcelas de intensidad cero (controles). Estos resultados están respaldados por otros estudios que indican que el uso de actividad ganadera extensiva provoca cambios en las propiedades del suelo (Gillmulina et al. 2020), como puede ser el carbono del suelo, la disponibilidad de nutrientes o la actividad biológica. En este caso nos centramos en los parámetros que hemos analizado.

Los resultados muestran un aumento del carbono orgánico oxidable en el suelo en aquellas parcelas en las que ha habido pastoreo. Este resultado puede atribuirse en parte a la incorporación de hojarasca, restos de ramas y partes de las plantas secas que se produce al ser pisadas por los rebaños que supone un aporte de sustrato para la biomasa microbiana del suelo, además del carbono presente en las heces de los rebaños, que posee una gran cantidad de materia vegetal seca (Gillmulina et al. 2020). Por otro lado, los ungulados realizan podas al comerse la vegetación lo que estimula el sobrecrecimiento radicular de las plantas (Zhou et al., 2019). Las raíces contribuyen al aumento de carbono del suelo a través de compuestos orgánicos exudados y de las raíces muertas que sirven como sustrato para los microorganismos. Estos últimos se encargan de transformar los restos orgánicos; una parte serán mineralizados y otra pasará a formar humus, una fracción orgánica mucho más estable y con múltiples beneficios para el suelo (Ontl y Schulte, 2012).

Se analizaron también los datos de la respiración edáfica basal (REB) y del carbono de la biomasa microbiana (CBM). Con estos resultados se obtuvo posteriormente el cociente metabólico (qCO_2) que es el ratio entre ambos parámetros. Los resultados obtenidos en el CBM muestran un aumento significativo como consecuencia de la actividad ganadera. Además se observa un ligero aumento, aunque no significativo, de este parámetro con respecto a la intensidad del pastoreo. Este incremento podría deberse al aumento de nutrientes provenientes de las heces de las ovejas que permite que los organismos puedan reproducirse y alcanzar una mayor población (Liu et al., 2012). Otros trabajos que se centran en el estudio del carbono de la biomasa microbiana en pastizales en presencia de pastoreo, sostienen que la comunidad microbiana en las zonas con presencia de rebaños están muy influenciadas por el aporte de carbono de las heces de los herbívoros y el aumento de la vegetación, que se renueva tras el paso del rebaño, o

por la exudación de compuestos de carbono por las raíces de las plantas (Tracy y Frank, 1998). Esto concuerda con los datos obtenidos en la REB, que muestran también la misma tendencia a aumentar conforme sube la intensidad del pastoreo, aunque la diferencia entre las zonas con los rebaños no es significativa para este parámetro.

Los datos obtenidos para el cociente metabólico (qCO_2) muestran cómo existe una diferencia significativa al comparar zonas con pastoreo respecto a controles. Este cociente, que relaciona la respiración edáfica basal con el carbono de la biomasa microbiana del suelo, puede considerarse un indicador de la utilización del carbono orgánico del suelo por parte de la comunidad microbiana como fuente de energía (Anderson y Domsch, 1993). En los resultados obtenidos se observan valores de qCO_2 muy inferiores para las parcelas con actividad ganadera respecto a los controles. Esto indica que en aquellas parcelas en las que no ha habido presencia de ungulados, la comunidad microbiana es menos eficiente a la hora de usar el carbono y por tanto respiran más para poder mantener la actividad metabólica. Esta disminución de la eficiencia en la respiración podría estar relacionada con una disminución de la calidad del sustrato o bien con una menor cantidad de nutrientes en el suelo. Por el contrario, una mayor eficiencia del uso del carbono por parte de los microorganismos puede relacionarse con el aumento del carbono orgánico oxidable obtenido (*Figura 6*), es decir, si los microorganismos son más eficientes en la respiración, consumen menos carbono y por tanto se almacena más carbono (Tao et al., 2023).

La relación entre el carbono de la biomasa y el carbono orgánico oxidable (*Figura 9*) aumentó con la intensidad del pastoreo, lo que indica que la estabilización del carbono está relacionada con la comunidad microbiana del suelo y su eficiencia (Marks et al., 2024).

Actividades enzimáticas:

Los resultados muestran un aumento de actividad de la enzima β -glucosidasa en las parcelas con actividad ganadera con respecto a la parcela control. El pastoreo estimula el crecimiento radicular que supone un aumento de materia orgánica tras la muerte de las raíces (Zhou et al., 2019). Además, más raíces conlleva a una mayor exudación de compuestos orgánicos por parte de estas, que representa un aumento del sustrato del que depende la actividad de la enzima β -glucosidasa. Este resultado también se ha encontrado en otros estudios donde reportó un aumento de la actividad de la enzima β -glucosidasa que se correlacionó de forma positiva con un aumento del carbono orgánico del suelo (Eivazi y Tabatabai, 1990).

La actividad de la enzima ureasa muestra un ligero aumento en las parcelas con presencia de rebaños. El aumento de la actividad de la enzima puede deberse al contenido

de compuestos nitrogenados de las heces de los ungulados, además del aporte de urea contenida en la orina de los animales. En un artículo publicado por Qi et al. (2023) en el que analizan el efecto del pastoreo en el suelo relacionado con la comunidad microbiana, también midieron un aumento de la actividad de la enzima ureasa. Este aumento lo atribuyeron al aporte de heces por parte de los rebaños que supone, como se ha comentado anteriormente, un sustrato para la comunidad microbiana del suelo.

La actividad de la enzima fosfatasa está relacionada con el ciclo del fósforo del suelo y se encarga de la mineralización del fósforo orgánico para obtener fósforo inorgánico (asimilable por las plantas) (Margalef et al., 2017). En las zonas con mayor presión ganadera (media y alta) la actividad de la enzima fosfatasa es inferior a la zona clasificada con baja. Esto podría deberse a que en los dos primeros casos (intensidad media y alta) hay más fósforo asimilable, como ortofosfatos que producen la inhibición de las enzimas (Nannipieri et al., 2011). Sin embargo, el resultado obtenido en la zona de intensidad baja, podría deberse a que la concentración de fósforo inorgánico puede no ser suficiente para la inhibición de la enzima y por ello se detecta una actividad superior. En la zona control, de intensidad cero, la actividad de la enzima fosfatasa no difiere significativamente de las intensidades medias y altas, pero los resultados obtenidos de carbono de la biomasa microbiana muestran que la población de microorganismos en este lugar es inferior al resto, es decir, a pesar de tener la misma actividad de la enzima fosfatasa, pueden estar produciendo más enzimas por cada microorganismo.

6. Conclusiones

Tras haber analizado los resultados, y teniendo en cuenta el objetivo planteado al inicio de este trabajo, podemos concluir que:

La presencia de rebaños, en las intensidades estudiadas, provoca cambios notables en los parámetros estudiados: aumenta la biomasa microbiana, el carbono orgánico oxidable y además mejora la eficiencia en el uso de carbono por parte de los microorganismos. Todo esto conlleva una mejor salud del suelo y de la resiliencia del ecosistema.

El aumento en la eficiencia del uso de carbono por parte de los microorganismos y la estabilización de carbono sugiere que el suelo puede actuar como un sumidero de

carbono más efectivo bajo técnicas de pastoreo, contribuyendo así a mitigar los efectos del cambio climático.

Además, estos resultados cumplen con los objetivos del “greening” (o pago verde), una herramienta de la Política Agraria Común (PAC) de la Unión Europea. Esta iniciativa busca incrementar la sostenibilidad de la agricultura a través de prácticas más respetuosas con el medio ambiente. Los resultados del estudio muestran que el uso del pastoreo gestionado adecuadamente puede mejorar la calidad del suelo incrementado de esta forma la productividad del mismo. La integración de prácticas de pastoreo gestionado en las políticas agrarias puede ser una vía para alcanzar estos objetivos, al mejorar la salud del suelo y contribuir al secuestro de carbono.

7. Proyección futura

Tras concluir que las intensidades estudiadas tienen un efecto beneficioso para las propiedades del suelo estudiadas, sería interesante definir el umbral, es decir, a partir de qué intensidad el pastoreo provoca cambios negativos en las propiedades del suelo así como ampliar el estudio a otras propiedades (físicas y químicas).

Por último, sería interesante aprovechar que estos rebaños pasan la otra mitad del año en Sierra Morena, que tiene suelos desarrollados sobre sustrato silíceo, para comparar nuestros resultados en suelos diferentes.

8. Bibliografía

- AEMET. Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (2024). *Datos de temperatura y lluvia media en los Campos de Hernán Perea*. <https://www.aemet.es>
- Arevalo, G. E., Sanchez-Amaya, J. M., Guillen-Marquina, I. (2023). Estudio del contenido materia orgánica por dos métodos analíticos en suelos de Honduras. *Ciencias Ambientales*, 57(1), 17723. <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.11>
- Anderson, T.H. (2003). Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 98, 285–293.
- Anderson, T.H., Domsch, K. H. (1993). The metabolic quotient for CO₂ (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(3), 393–395. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-4)
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M., & Etchevers-Barra, J. (2002). Derivation of soil quality indicators in the context of sustainable agriculture. 36(5), 605-620.
- Blondel, J. (2006). The 'Design' of Mediterranean Landscapes: A Millennial Story of Humans and Ecological Systems during the Historic Period. *Human Ecology*, 34, 713–729. <https://doi.org/10.1007/s10745-006-9030-4>
- Conant, R. T., & Paustian, K. (2002). Potential soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 1143. <https://doi.org/10.1029/2001GB001661>
- Doran, J. W., & Safley, M. (1997). Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: *Biological indicators of soil health*. 89, 1-28.
- Duval, M. E., Galantini, J. A., Martínez, J. M., & Limbozzi, F. (2018). Labile soil organic carbon for assessing soil quality: influence of management practices and edaphic conditions. *CATENA*, 171, 316-326.
- Eivazi, F., & Zakaria, A. (1993). fl-Glucosidase activity in soils amended with sewage sludge*. In *Ecosystems and Environment*, 43.
- Eivazi, F., & Tabatabai, M. A. (1990). Factors affecting glucosidase and galactosidase activities in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(7), 891–897. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90126-K](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90126-K)




- FAO. (2024). Pastoreo <https://www.fao.org/policy-support/policy-themes/pastoralism/es/>
- Gilmullina, A., Rumpel, C., Blagodatskaya, E., & Chabbi, A. (2020). Management of grasslands by mowing versus grazing – impacts on soil organic matter quality and microbial functioning. *Applied Soil Ecology*, 156, 103701
- IUSS Working Group WRB, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva, S. (2017). The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1-22.
- Lal, R., Monger, C., Nave, L., & Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 376, Issue 1834). Royal Society Publishing. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0084>
- Liu, N., Zhang, Y., Chang, S., Kan, H., & Lin, L. (2012). Impact of grazing on soil carbon and microbial biomass in typical steppe and desert steppe of inner mongolia. *PLoS ONE*, 7(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036434>
- Margalef, O., Sardans, J., Fernández-Martínez, M., Molowny-Horas, R., Janssens, I. A., Ciais, P., Goll, D., Richter, A., Obersteiner, M., Asensio, D., & Peñuelas, J. (2017). Global patterns of phosphatase activity in natural soils. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01418-8>
- Marks, E. A. N., Barbosa, J. M., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Albolafio, S., Velamazán, M., García-Carmona, M., & Sánchez-Zapata, J. A. (2024). Ungulate herbivores promote contrasting modifications of soil properties and organic carbon stabilization in a grazed grassland versus rewilded woodland environment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108983>
- Metera, E., Sakowski, T., Słoniewski, K., & Romanowicz, B. (2010). Grazing as a tool to maintain biodiversity of grassland – a review. *Animal Science Papers and Reports*, 28(4), 315-334.






- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., Renella, G. (2011). Role of Phosphatase Enzymes in Soil. In: Bünemann, E., Oberson, A., Frossard, E. Phosphorus in Action. Soil Biology, 26. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_9
- Nannipieri, P., Trasar-Cepeda, C., & Dick, R. P. (2018). Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), 11–19. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1245-6>
- Nannipieri, P., Ceccanti, B., Cervelli, S. and Matarese, E. (1980). Extraction of phosphatase, urease, proteases, organic carbon, and nitrogen from soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44, (p. 1011-1016)
- Ontl, T. A. & Schulte, L. A. (2012) Soil Carbon Storage. *Nature Education Knowledge* 3(10):35
- Qi, L., Zhang, M., Yin, J., Ren, W., Sun, S., Chen, Z., Yuan, T., & Guo, L. (2023). The interactive effect of grazing and fertilizer application on soil properties and bacterial community structures in a typical grassland in the central Inner Mongolia Plateau. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1174866. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1174866>
- RStudio Team (2023). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
- Soil Survey Staff. 2022. Keys to Soil Taxonomy, 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service
- Soussana, J.-F., & Lemaire, G. (2014). Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 9-17.
- Tabatabai, M., (1982). Amidase and urease activities in plants. *Chemical and Microbiological Properties-Agronomy Monography*. 9, (p 501-538).
- Tabatabai, M., and Bremner, J. (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil biology and biochemistry*, 1(4), (p 1-307).
- Tao, F., Huang, Y., Hungate, B. A., Manzoni, S., Frey, S. D., Schmidt, M. W. I., Reichstein, M., Carvalhais, N., Ciais, P., Jiang, L., Lehmann, J., Wang, Y. P., Houlton, B. Z., Ahrens, B., Mishra, U., Hugelius, G., Hocking, T. D., Lu, X., Shi, Z., ... Luo, Y. (2023). Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature*, 618(7967), 981–985. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06042-3>

- Tian, J., Ge, F., Zhang, D., Deng, S., & Liu, X. (2021). Roles of Phosphate Solubilizing Microorganisms from Managing Soil Phosphorus Deficiency to Mediating Biogeochemical P Cycle. *Biology*
- Tracy, B. F., & Frank, D. A. (1998). *Herbivore influence on soil microbial biomass and nitrogen mineralization in a northern grassland ecosystem: Yellowstone National Park.*
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 703-707.
- Walkley A. & Black I., (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*.37, 29-38.
- Zhou, G., Luo, Q., Chen, Y., He, M., Zhou, L., Frank, D., He, Y., Fu, Y., Zhang, B., & Zhou, X. (2019). Effects of livestock grazing on grassland carbon storage and release override impacts associated with global climate change. *Global Change Biology*, 25(3), 1119-1132. <https://doi.org/10.1111/gcb.14533>
- Zhou, G., Zhou, X., He, Y., Shao, J., Hu, Z., Liu, R., Zhou, H., & Hoseinibai, S. H. (2017). Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 23, 1167–1179. <https://doi.org/10.1111/gcb.13431>

9. Anexo: Objetivos de desarrollo sostenible

Objetivos de Desarrollo Sostenible relativos al TFG

Objetivos de desarrollo sostenible	Motivos
 <p>FIN DE LA POBREZA: Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo</p>	<p>El presente trabajo promueve la ganadería extensiva que supone una fuente de ingresos para las comunidades locales, fomentando el desarrollo económico y la reducción de la pobreza.</p>
 <p>HAMBRE CERO: Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible</p>	<p>Aumenta la productividad vegetal y la biodiversidad, contribuyendo a sistemas alimentarios más sostenibles y resilientes.</p>
 <p>SALUD Y BIENESTAR: Garantizar una vida sana y promover el bienestar en todas las edades y para todos</p>	<p>Mejora la salud del suelo, lo que lleva a ecosistemas más saludables y a un medio ambiente más equilibrado, que repercute de forma positiva en la salud humana.</p>

 <p>8 TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO: TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO: Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.</p>	<p>Apoya el crecimiento económico inclusivo y sostenible en las comunidades rurales mediante la promoción de la ganadería extensiva.</p>
 <p>11 CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES: CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES: Lograr que las ciudades y los asentamientos urbanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.</p>	<p>Al conservar los paisajes naturales y promover prácticas sostenibles, contribuye a la resiliencia de las comunidades locales.</p>
 <p>12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES: Garantizar las modalidades de consumo y producción sostenibles</p>	<p>Fomenta prácticas de pastoreo sostenibles que mantienen la calidad del suelo y aseguran el uso responsable de los recursos naturales.</p>
 <p>13 ACCIÓN POR EL CLIMA: ACCIÓN POR EL CLIMA: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos</p>	<p>A través de la mejora en la eficiencia del uso de carbono y la estabilización de carbono en el suelo, contribuye a la mitigación del cambio climático.</p>
 <p>15 VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES: VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES: Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar los bosques de forma sostenible, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica.</p>	<p>Contribuye a la conservación y mejora de los ecosistemas terrestres al estudiar y promover prácticas de pastoreo que benefician la biodiversidad y la calidad del suelo.</p>

