



Vigilada Mineducación



ESTUDIO TÉCNICO Y DE COSTOS DE TRANSICIÓN HACIA UNA PRODUCCIÓN
AGROECOLÓGICA DE PASTOS COMO BASE NUTRICIONAL EN LECHERÍA
ESPECIALIZADA DE TRÓPICO ALTO: UN ENFOQUE DESDE LA SALUD
MICROBIANA DE SUELOS

SERGIO ANDRÉS PIEDRAHITA WOOD

Trabajo de Grado

Director:

JUAN ESTEBAN ESCALANTE GÓMEZ, PhD

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN

MAESTRÍA EN AGRONEGOCIOS

MEDELLÍN

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	pág. 5
Abstract	pág. 6
Introducción	pág. 7
1. Planteamiento del Problema	pág. 9
2. Justificación	pág. 11
3. Objetivos	pág. 12
• 3.1. Objetivo General	pág. 12
• 3.2. Objetivos Específicos	pág. 12
4. Marco de Referencia	pág. 13
• 4.1. Suelos	pág. 13
• 4.2. Salud de Suelos	pág. 14
• 4.3. Ganadería Regenerativa	pág. 15
5. Metodología	pág. 17
• 5.1. Enfoque	pág. 17
• 5.2. Alcance	pág. 17
• 5.3. Diseño	pág. 18
• 5.4. Población	pág. 19
• 5.5. Instrumento	pág. 19
6. Presentación de Resultados	pág. 21
• 6.1. Etapa 1: Implementación de Protocolos de Producción de Bacterias, Hongos y Depredadores Benéficos	pág. 21
• 6.2. Etapa 2: Disminución del Uso de Agroquímicos Sintéticos	pág. 32
○ 6.2.1. Ahorro en Agroquímicos Durante el Período de Estudio	pág. 32
○ 6.2.2. Ahorros Derivados del Uso de Enmiendas Biológicas SaBio	pág. 32
○ 6.2.3. Composición del Hato y Proyección de Ahorros	pág. 33
○ 6.2.4. Contexto Histórico en el Uso de Productos Biológicos	pág. 34
• 6.3. Etapa 3: Evaluación de Costos de Producción y Análisis Financiero	pág. 34
○ 6.3.1. Escenario Bajo Manejo Convencional con Agroquímicos (Modelo Base)	pág. 34

○ 6.3.2. Escenario con Fertilización y Control de Plagas Usando Enmiendas Biológicas SaBio (Modelo Alternativo)	pág. 36
• 6.4. Etapa 4: Medición y Análisis de Indicadores Clave	pág. 38
○ 6.4.1. Indicadores Analizados	pág. 38
○ 6.4.2. Introducción y Contexto Inicial	pág. 38
○ 6.4.3. Datos de Campo	pág. 40
○ 6.4.4. Calidad del Forraje	pág. 41
○ 6.4.5. Calidad Composicional de la Leche	pág. 42
○ 6.4.6. Resultados Detallados por Lote	pág. 43
○ 6.4.7. Análisis Comparativo Entre Clústeres	pág. 47
7. Análisis de Resultados	pág. 49
• 7.1. Etapa 1: Implementación de Protocolos de Producción de Bacterias, Hongos y Depredadores Benéficos	pág. 49
• 7.2. Etapa 2: Disminución del Uso de Agroquímicos Sintéticos	pág. 50
• 7.3. Etapa 3: Evaluación de Costos de Producción y Análisis Financiero	pág. 52
• 7.4. Etapa 4: Medición y Análisis de Indicadores Clave	pág. 53
○ 7.4.1. Salud del Suelo	pág. 53
○ 7.4.2. Calidad del Forraje	pág. 54
○ 7.4.3. Calidad de la Leche	pág. 54
8. Conclusiones	pág. 56
9. Referencias	pág. 59

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

- **Figura 1.** Estructura del marco conceptual pág. 13
- **Figura 2.** Componentes del diseño metodológico pág. 17
- **Figura 3.** Imagen de dron: Finca Montellano, zona alta (tres potreros en estudio SaBio) pág. 23
- **Figura 4.** Análisis fisicoquímico de suelos, zona alta Montellano pág. 24
- **Figura 5.** Parámetros de calidad microbiológica para suelos y enmiendas biológicas pág. 28
- **Figura 6.** Parámetros microbiológicos y fisicoquímicos ideales para diferentes cultivos y ecosistemas pág. 29
- **Figura 7.** Pluviosidad registrada en Finca Montellano durante el estudio..... pág. 40

Tablas

- **Tabla 1.** Aplicaciones en campo de enmiendas biológicas SaBio pág. 27
- **Tabla 2.** Resultados de laboratorio microbiológico SaBio, enmiendas Finca Montellano pág. 29
- **Tabla 3.** Resultados del tratamiento: testigo (fertilización y control de plagas convencional) pág. 30
- **Tabla 4.** Resultados del tratamiento: aplicación solo bio-líquidos pág. 31
- **Tabla 5.** Resultados del tratamiento: aplicación de biosólidos y bio-líquidos .. pág. 31
- **Tabla 6.** Costos de agroquímicos y fertilizantes por hectárea/mes pág. 32
- **Tabla 7.** Ahorros en agroquímicos y fertilizantes convencionales durante el estudio pág. 33
- **Tabla 8.** Composición del hato, Finca Montellano (octubre 2024) pág. 33
- **Tabla 9.** Flujo de caja bajo el manejo convencional con agroquímicos pág. 35
- **Tabla 10.** Flujo de caja bajo esquema de uso de enmiendas SaBio y reducción del uso de agroquímicos pág. 36
- **Tabla 11.** Comparación de indicadores financieros clave pág. 37
- **Tabla 12.** Porcentaje de costos en agroquímicos sobre costos variables totales en Montellano pág. 52

RESUMEN

Este trabajo de grado se centraba en el desarrollo de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano (a partir de un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos). Para tal propósito, se formuló un estudio de naturaleza cuantitativa, alcance exploratorio y diseño experimental en el que se abordaron, a través de una estructura de cuatro (4) etapas, aspectos relevantes de cara al modelo alternativo (y en el que se contempla la aplicación de enmiendas biológicas: bio líquidos y biosólidos)

La etapa 1 permitió conocer la dinámica de implementación de protocolos de producción de bacterias y hongos. La etapa 2 se orientó al análisis derivado de la disminución en el uso de agroquímicos sintéticos. La etapa 3 presentó la viabilidad económica del modelo desde la evaluación financiera mientras que la etapa 4 dio paso a la medición y monitoreo de indicadores clave.

Los resultados evidencian que las enmiendas biológicas mejoran la biodiversidad microbiana en los suelos (se observó un aumento del 81% en la cantidad de especies de hongos y bacterias benéficas, con casi cinco veces más especies exclusivas respecto a los suelos manejados con agroquímicos convencionales) y la composición de la leche (presentó un incremento del 13% en el contenido de grasa y del 6.5% en el contenido de proteína respecto a la obtenida en potreros manejados con agroquímicos convencionales). Además, favorecen la disminución de los costos de agroquímicos (en este caso en un 54%, pasando de \$575,360 por hectárea/mes - referencia para el manejo convencional de pasturas en la región - a \$264,600 por hectárea/mes) e impactan positivamente en las condiciones ambientales del territorio, sus fuentes hídricas y sus suelos (al evitarse la aplicación de agroquímicos líquidos - insecticidas y fungicidas - y fertilizantes edáficos convencionales)

Palabras clave: suelos, salud del suelo, ganadería regenerativa.

ABSTRACT

This thesis focused on performing a technical and cost study for pasture production as a nutritional foundation for a dairy farm in the high-altitude tropics of Colombia, based on an approach that focuses on soil microbial health. To this end, a study of a quantitative nature, exploratory scope, and experimental design was formulated, addressing key aspects of the alternative model through a four-stage structure (which includes the application of biological amendments: bioliquids and biosolids).

Stage 1 involved understanding the dynamics of implementing protocols for beneficial bacterial and fungal production. Stage 2 focused on analyzing the effects of reducing the use of synthetic agrochemicals. Stage 3 assessed the economic feasibility of the model through financial evaluation, while Stage 4 involved measuring and monitoring key indicators.

The results demonstrate that biological amendments enhance microbial biodiversity in soils (an 81% increase was observed in the number of beneficial fungal and bacterial species, with almost five times more exclusive species compared to soils managed with conventional agrochemicals) and improve milk solids composition (showing a 13% increase in fat content and a 6.5% increase in protein content compared to milk obtained from pastures managed with conventional agrochemicals). Additionally, they contribute to reducing agrochemical costs (by 54% in this case, from \$575,360 COP per hectare/month—used as a reference for conventional pasture management in the region—to \$264,600 COP per hectare/month) and have a positive impact on the environmental conditions of the area, its watershed, and its soils (by eliminating the use of liquid agrochemicals—such as insecticides and fungicides—as well as conventional soil fertilizers).

Keywords: soil, soil health, regenerative livestock farming

INTRODUCCIÓN

Montellano es una ganadería especializada en la producción de leche que, desde su fundación en 1933, se ha enfocado en el mejoramiento de la raza Holstein pura registrada en Colombia. Como es costumbre, la alimentación de las vacas en esta zona del trópico alto (encima de 2000 msnm) se ha efectuado a partir de pastos, cuyo cultivo ha tenido como base el uso de agroquímicos (insecticidas, fungicidas, fertilizantes edáficos y foliares). Estos productos, empleados para la alimentación de la planta y el control de plagas, han afectado negativamente los niveles de productividad del suelo (pues las poblaciones de microorganismos benéficos mueren al estar expuestos constantemente a toxinas) y con ello, las dinámicas de rendimiento y eficiencia de la actividad económica.

Para revertir esta situación (y eliminar gradualmente la dependencia que genera el uso intensivo de los agroquímicos), se comenzó en 2020 un proceso de transición hacia productos de origen biológico para el cultivo de pastos. En este sentido, la literatura destaca el impacto que la biodiversidad de plantas y suelo en granjas lecheras presenta en la reducción del uso de fertilizantes e insecticidas químicos (Zhang et. al, 2022). Además, resalta su efecto en términos de mejora respecto a índices ecológicos como la calidad del suelo, la conservación de la biodiversidad y la recuperación ambiental (Oliveira et. al, 2022)

Teniendo en cuenta lo anterior y, dada la importancia evidente del suelo y su balance ecológico en poblaciones de microorganismos benéficos, este trabajo de grado se centra en la elaboración de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano (a partir de un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos). Para efectos de desarrollo, se aborda a continuación la problemática, la justificación y los objetivos del estudio. De manera posterior

se estructura el marco conceptual y la metodología. Por último, se presentan los resultados obtenidos y conclusiones derivadas del ejercicio investigativo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante décadas, el sector lechero en Colombia ha enfrentado múltiples crisis (Semana, 2024). Esta problemática, hoy de naturaleza recurrente y estructural, es explicada por el incremento en los costos de los insumos productivos (en 2022 crecieron entre un 43% y un 60%) y su consecuente impacto en las dinámicas de consumo, pues el aumento en precios ha derivado en una caída sustancial en la demanda de productos lácteos (disminución del 9%) (Agronegocios, 2022).

Como puede evidenciarse, la crisis actual parte del encarecimiento de los agroquímicos utilizados en la producción de pasturas (motivada por las constantes presiones inflacionarias que se han enfrentado en la postpandemia). Esta situación, sumada a la dependencia existente frente a este tipo de productos ha generado un círculo vicioso que resulta difícil de romper y en el que los eslabones más débiles (campesinos productores de leche) suelen llevarse la peor parte (el aumento en los precios de la leche al consumidor genera una disminución en la demanda de lácteos y derivados - los grandes fabricantes acumulan notables cantidades de inventario de producto terminado - el precio de compra a ganaderos cae drásticamente).

Considerando la problemática planteada y en aras de tanto de mitigar el uso intensivo de agroquímicos (para reestablecer el equilibrio ecológico y microbiano del suelo, a través de aplicaciones de estos microorganismos benéficos cultivados) como de mejorar los niveles de desempeño económico del sector (incluso aunque los precios de compra a ganaderos disminuyan como lo han hecho – 25% entre abril de 2023 y abril de 2024) se ha formulado este proyecto de grado, el cual tiene por objeto el desarrollo de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca

lechera del trópico alto colombiano (a partir de un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos).

JUSTIFICACIÓN

La crisis del sector lechero exige la formulación y despliegue de modelos innovadores que permitan alcanzar, desde un marco de calidad, niveles de desempeño positivos en el plano financiero. Lo anterior implica un cambio de paradigma en las lógicas operativas de los productores, a partir de sustitutos que permitan eliminar la dependencia hacia agroquímicos que han convertido los suelos en unos hábitats estériles, sin vida microbiana y dependientes de la nutrición sintética. Este contexto, ha motivado el planteamiento del presente trabajo de grado, el cual tiene por objeto el desarrollo de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano (a partir de un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos).

A continuación, se exponen algunos de los principales argumentos subyacentes a su desarrollo:

- La salud del suelo se deteriora al hacer uso continuo de agroquímicos, siendo estos tóxicos para la vida de microorganismos benéficos en el suelo
- Al no haber un balance ecológico en el suelo (lo que permitiría llevar a cabo procesos biológicos naturales de degradación y reutilización de nutrientes por las plantas), los productores de alimentos se ven en la obligación de usar agroquímicos para nutrir las plantas y controlar sus plagas.
- Al reestablecer la vida natural del suelo, los pastos podrán asimilar los nutrientes ya existentes (en el suelo), volviéndose estos biodisponibles.
- Se limita la dependencia hacia el uso intensivo de agroquímicos, lo que contribuye a disminuir los costos de producción por litro de leche
- Gracias a la transición, se obtiene un producto de mejor calidad para el mercado (lo cual se traduce en mayores probabilidades de consumo)

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Este trabajo de grado se centra en la elaboración de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano (a partir de un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar los protocolos de producción de bacterias, hongos y depredadores benéficos desarrollados por SaBio
- Disminuir el uso de agroquímicos sintéticos utilizados para nutrir los pastos y controlar sus plagas
- Evaluar los costos asociados a la producción de leche (al usar menos agroquímicos y potenciar la nutrición natural de la planta en suelos vivos y sanos)
- Medir y mejorar los indicadores clave (KPI s) en producción de pasto: aforo por metro cuadrado, calidad bromatológica, calidad composicional de leche

MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo presenta una revisión sistemática de la literatura, con el propósito de explorar diferentes términos y variables relevantes para el estudio. Los conceptos y análisis fueron desplegados de manera secuencial a partir de la siguiente estructura:

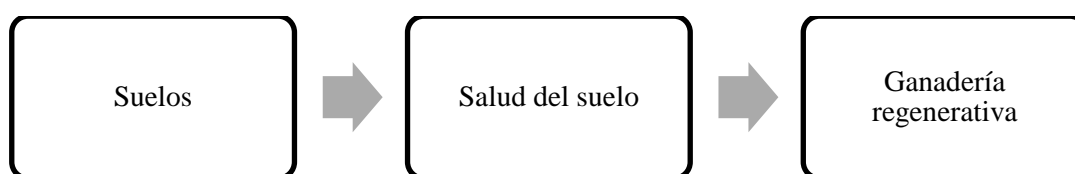


Figura 1. Estructura marco conceptual

Suelos

Considerados durante siglos una materia inerte que se originaba de la transformación química del lecho de roca, los suelos hoy se definen como un recurso único y complejo en el que una piedra desintegrada y disuelta - en parte mezclada con materiales orgánicos y completamente modificada – se transforma en una nueva sustancia (separada del aún sólido y no disuelto lecho de roca) capaz de recuperarse y regenerarse (Feller et. al. 2022). Este objeto natural, distinto a las rocas desde su composición y origen, es afectado en términos de calidad, conservación y fertilidad, por factores de tipo físico, químico y biológico (elementos nutritivos, humedad, aireación radicular, salinidad, sustancias tóxicas, textura, estructura, estabilidad física, temperatura y profundidad) (SRUC, 2019) y por la actividad microbiana existente (que puede potencializarse a través de la utilización de subproductos industriales o mediante la elaboración de estiércol artificial o compost) (Arena, 1955).

Los suelos presentan una notable influencia en las dinámicas de múltiples sectores ligados al agro. En el caso específico de la ganadería, la literatura destaca el nexo interacción suelos-pasto-nutrición, a partir de (a) la identificación de deficiencias de minerales (se concluye que en Colombia existe una deficiencia general en fósforo y en potasa), (b) el

análisis de las condiciones climáticas de los territorios (teniendo en cuenta que las abundantes lluvias que se dan lavan el suelo, lo surcan y arrastran el humus y sus elementos fertilizantes) y (c) la valoración de implicaciones a largo plazo (Ancízar Sordo, 1941).

Salud de Suelos

A través de estudios dedicados al análisis de la formación, química, morfología y clasificación de suelos se ha podido evidenciar el vínculo existente entre factores como la calidad, la salud y el desempeño en éstos (SRUC, 2019). Además, se ha demostrado también que la salud del suelo presenta notables efectos en las lógicas de transformación y desarrollo agrícola de las regiones (Boaventura et. al, 2023)

El Cerrado Brasileño, por ejemplo, se ha convertido en un punto de referencia en este sentido pues este extenso ecosistema (ocupa el 21% del territorio con cerca de 2 millones de kilómetros cuadrados), otrora caracterizado por sus bajas condiciones de fertilidad (pasturas de baja calidad nutricional en sabanas extensas de suelos ácidos, altos en aluminio y bajo contenido de materia orgánica), ha logrado mejorar significativamente sus niveles de productividad y desempeño (industria agraria concentra el 54.5% de la soja a nivel mundial, con flujos de aproximadamente USD 10 billones por año) a partir de la implementación de técnicas innovadoras que (a) utilizan cobertura vegetal permanente para prevenir problemáticas de erosión, (b) emplean material vegetativo para ciclar los nutrientes disponibles desde los horizontes profundos hasta la interfaz del suelo con la atmosfera y (c) hacen uso de bacterias (variedades de *Rhizobium* adaptadas e inoculadas a las raíces de los granos cultivado) para fijar nitrógeno a las plantas (Boaventura et. al, 2023)

Cabe mencionar que este modelo de transformación del suelo se ha implementado también en los Llanos Orientales de Colombia. Esta zona, en la que las condiciones de acidez y pobre fertilidad son similares a las presentadas en territorio brasilero, ha replicado

con éxito las prácticas adoptadas años atrás en el Cerrado Brasileño (Carlos Eduardo Mesa, socio fundador Agropecuaria Aliar S.A., comunicación personal, septiembre 2024).

Ganadería regenerativa

La ganadería regenerativa se define como el conjunto de prácticas, acciones y estrategias implementadas en la ganadería (y sus modelos productivos) con el ánimo de favorecer la regeneración del ecosistema y maximizar el beneficio económico sostenible por hectárea (sostenibilidad = ambiental, social y económica) (Acoganar, s.f). Se trata de una visión del agro que contribuye al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (especialmente al ODS 2 - para el año 2030, asegurar sistemas sustentables de producción de alimentos que implementen practicas agropecuarias resilientes que incrementen la productividad, que mantengan los ecosistemas, fortalezcan la adaptabilidad al cambio climático, a eventos climáticos extremos, sequia, inundaciones, otros desastres naturales y que de manera progresiva mejoren la tierra y calidad del suelo) y en la que se contemplan cinco principios estratégicos: (1) evitar voltear la tierra, (2) mantener la tierra cubierta todo el año, (3) mantener plantas con sistema radicular sano por un periodo de tiempo largo, (4), incorporar biodiversidad y (5) integrar animales al sistema productivo (Khangura et al., 2023)

La literatura recalca el papel del ganado en el marco de los sistemas de agricultura regenerativa. En específico, se señala (a) su importancia en términos ecológicos (pues a través de sistemas de pastoreo ganadero se captura carbono en el suelo, se produce biodiversidad y se contribuye a la salud del sueño) (Cusworth et al., 2022), (b) su efecto mitigador de cara al cambio climático (vía mejor retención de agua e incremento en actividad microbiana) (Galloway et al., 2024) y (c) su impacto favorable en las funciones ecosistémicas fundamentales (desde la captura de carbono en el suelo a través de la producción de biomasa en plantas con altas tasas de fotosíntesis se mejora la simbiosis entre microbios del suelo y las

plantas y se mejora la estructura del suelo y así su habilidad de retener agua) (Khangura et. al, 2023)

La ganadería regenerativa conecta con el rejuvenecimiento del suelo (se busca rejuvenecer paisajes y granjas al estimular procesos naturales del ecosistema incluyendo el agua, nutrientes y fuentes de carbono) (Bless, 2024). Lo anterior implica enfocar esfuerzos en la reducción de emisiones provenientes del uso intensivo de fertilizantes nitrogenados (que son los que liberan el gas de efecto invernadero - óxido nítrico - a la atmósfera), la implementación de prácticas de pastoreo sostenible (mitigando el cambio climático al capturar carbono en los suelos de estas planicies con pasturas perenes) (Smith et. al 2024) y la articulación con los servicios eco sistemáticos que la naturaleza ofrece (y que ayuda a la restauración, preservación y optimización de los recursos (Acoganar, s.f).

METODOLOGÍA

En esta sección se presentan todos los elementos asociados al método. Para tal fin se hace referencia al enfoque elegido, al alcance definido, al diseño seleccionado, a la población objeto de estudio y al instrumento utilizado.



Figura 2. Componentes diseño metodológico

Enfoque

Este proyecto de grado contempla un enfoque cuantitativo, pues tiene por objeto la elaboración de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano (a partir de un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos).

Los trabajos de naturaleza cuantitativa destacan por su objetividad en el análisis del fenómeno de interés (McMillan, 2016). Para tal fin, hacen uso de métodos numéricos/estadísticos (regresiones, técnicas de big data, entre otros) que permiten (a) recopilar datos (en grandes volúmenes), (b) formular hipótesis, (c) testear relaciones entre variables (no solo de causa-efecto) y (d) obtener conclusiones marcadas por el rigor (Hernández & Mendoza, 2018; Rodríguez Puerta, 2020; Vásquez Pérez, 2024).

Alcance

Esta investigación presenta un alcance exploratorio, pues se centra en el desarrollo de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano (a partir de un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos).

Este tipo de trabajos resultan idóneos para descubrir ideas frente a un tema desconocido, poco estudiado o novedoso (Sampieri et al., 2014). Se trata de estudios marcados por la flexibilidad, la amplitud y la versatilidad, en los que se busca a través de técnicas como las encuestas de experiencia, los estudios de caso y los estudios piloto, abrir el terreno al análisis de problemáticas novedosas o desconocidas (ayudando a identificar conceptos prometedores y a establecer prioridades de cara a investigaciones futuras) (Ramos-Galarza, 2020; Rusu C., 2011).

Los estudios exploratorios resultan claves en campos con escasa investigación previa, pues permiten generar hipótesis e identificar variables en la medida en que se avanza en la comprensión de un fenómeno (Stewart, 2024). En específico, contribuyen a determinar tendencias, comprender áreas, ambientes, contextos y situaciones de estudio, explorar relaciones potenciales entre variables, y sentar las bases para trabajos futuros (Ortiz, 2020; Sampieri et al., 2014).

Diseño

Para dar cumplimiento al objetivo definido (elaboración de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano) este trabajo de grado plantea un diseño experimental.

La investigación experimental busca, mediante la manipulación intencional de una o más variables independientes, conocer el impacto sobre una o más variables dependientes (Ibid, s.f; Sampieri et al., 2014). Bajo este marco, se definen tanto grupos de control (aquel en el que está ausente la variable independiente) como de tratamiento (aquel en el que está presente la variable independiente) y se busca demostrar, de forma válida y confiable, la existencia de vínculos o relaciones entre variables (si se logra que, al variar intencionalmente

una variable independiente, se presente una variación en una variable dependiente)

(Rodríguez-Puerta, 2020)

Cabe aclarar que existen dos contextos generales en los que se lleva a cabo un diseño experimental: en laboratorio y en campo. Los experimentos de laboratorio se realizan en condiciones controladas, en los que se eliminan las fuentes de invalidación interna, así como otras posibles variables independientes que no son de interés. Los experimentos de campo, por su parte, se realizan en un contexto natural y en la manipulación sobre las variables independientes es limitada por la dinámica del entorno (Sampieri et al., 2024).

Población

Por población se entiende el conjunto de objetos o sujetos que forman parte de un grupo y que comparten condiciones de homogeneidad, temporalidad y espacio (Arias Gómez et al., 2016). La muestra, por su parte, está integrada por un subgrupo representativo de este universo (el cual es seleccionado de forma aleatoria o no aleatoria) que permite la extrapolación de resultados y la obtención de conclusiones válidas (asegurando que las inferencias obtenidas del análisis sean precisas y puedan aplicarse, con un alto grado de confianza, al grupo en su totalidad) (Arias Gómez et al., 2016; Camacho de Báez, 2008).

Para el caso específico del presente trabajo de grado se define a la finca Montellano como universo poblacional. Para efectos muestrales se considerarán, exclusivamente, el sector alto del predio, el cual está dividido a su vez en 3 potreros.

Instrumento

Un instrumento es una herramienta de registro de datos asociados a un objeto de estudio, que debe representar los conceptos o variables foco de análisis (Sampieri et al., 2014). Estos mecanismos, que deben cumplir principios de confiabilidad, validez y objetividad se concentran en el ámbito cuantitativo en el desarrollo de cuestionarios, pruebas

proyectivas y protocolos (que registran los hechos que captan otros instrumentos como microscopios, reglas, basculas, entre otros) (De la lama et al, 2021).

Considerando el propósito de este proyecto de grado y de cara a la recolección de la información, se hará uso de fuentes e instrumentos de carácter primario (mediciones cuantitativas y cualitativas de pasto, suelos y leche en campo, análisis en laboratorio de microbiología suelos, bromatológico de pastos y leche).

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A la luz del objetivo central definido, se procede con la elaboración de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano (a partir de un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos). Para tal fin, se desarrollan a continuación cuatro (4) etapas:

ETAPA 1: IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLOS DE PRODUCCIÓN DE BACTERIAS, HONGOS Y DEPREDADORES BENEFICOS

Este trabajo de grado comenzó (enero de 2024) en paralelo con la firma de un contrato de prestación de servicios entre Terrasabia Agro SAS (el consultor, bajo su marca SaBio) y Wood y Cía SAS, empresa propietaria de la finca Montellano. El vínculo, cuya duración estipulada fue de 12 meses (y que cuenta con una cofinanciación del 80% por parte de Comfama) contemplaba varios componentes, los cuales se explican a continuación:

En primer lugar, se efectuó la capacitación del personal y la definición de roles (febrero y marzo de 2024). La capacitación se llevó a cabo de forma virtual (a través de la plataforma Simbiosis, propiedad de SaBio) utilizando una metodología de aprendizaje enfocada en el hacer (learning-by-doing) y en la que se buscó, principalmente, desaprender prácticas tradicionales de fertilización y control de plagas basadas en el uso intensivo de agroquímicos. Este espacio fue fundamental para que los operarios de campo logaran, desde un nuevo paradigma cultural, conocer acerca de nuevos modelos de gestión agroecológica y asumieran con receptividad las responsabilidades de seguimiento a nivel protocolos y recetas impartidos por SaBio. En cuanto a la asignación de roles, se procedió con la nominación de un gestor de suelos (coordinador del proyecto - Andrés Piedrahita), un criador de microbios (se encarga de preparar las pilas, voltearlas y monitorear diariamente su temperatura y

humedad- Esteban Mesa) y un cuidador de suelos (aplica las enmiendas sólidas y líquidas en los potreros, observando de cerca el efecto de estas aplicaciones en la productividad de los pastos y el control de plagas - Jairo Bermúdez).

Por otro lado, se seleccionó y adecuó el sitio para el armado de las pilas de compost (biofábrica) y la instalación del biorreactor. El lugar elegido fue el patio del establo (una casa histórica construida en tapia con un patio techado y piso de cemento, protegido del sol y el viento) debido a sus apropiadas condiciones de temperatura estable y humedad adicionada. Es importante mencionar que este patio se encuentra ubicado debajo de los corrales en los que alojan las terneras, lo que facilita el acceso al estiércol (uno de los insumos principales para las pilas de compost). Además, es adyacente a una fuente de agua de nacimiento (sin trazas de químico alguno), lo que resulta ideal para el mantenimiento de la humedad de las pilas y el llenado del biorreactor.

En tercera instancia se procedió con la selección aleatoria de los potreros a ser sometidos a los diferentes tratamientos experimentales en la zona alta de la finca (que cuenta con tres potreros). La designación fue la siguiente (ver Figura 3)

1. Potrero Rincón 1 (13,988 metros cuadrados de área) aplicación solo bio líquidos, fertilización edáfica convencional a dosis de 220 kilos/ha.
2. Potrero Cañero (11,769 metros cuadrados de área) aplicación biosólidos y bio líquidos, fertilización edáfica convencional a la mitad de la dosis, 110 kilos/ha.
3. Potrero Casa Grande (14,098 metros cuadrados de área) testigo, fertilización y fumigación para control de plagas convencional.

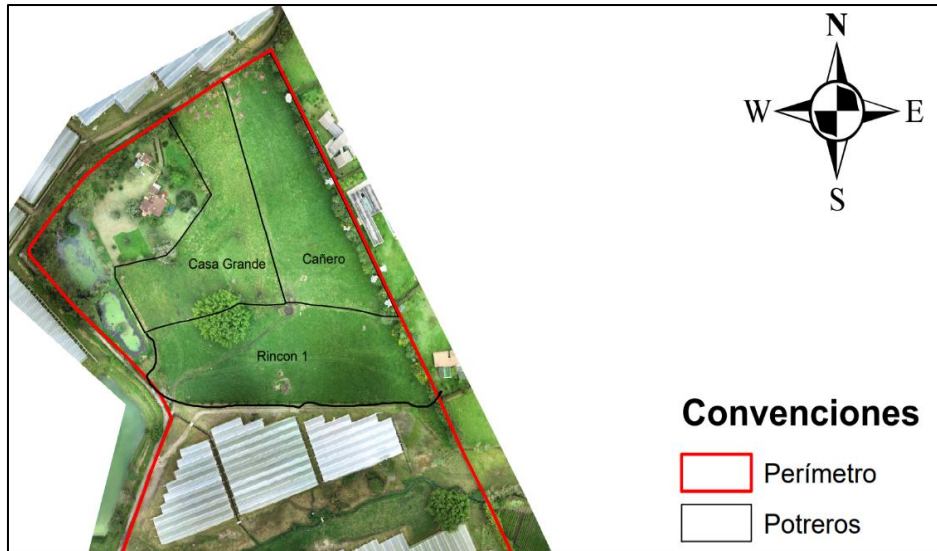


Figura 3. Imagen dron finca Montellano, zona alta (tres potreros en estudio SaBio)

Previo al inicio de la aplicación de las enmiendas biológicas, se envió muestra de suelo para análisis fisicoquímico de la zona alta para efectos de caracterización de estado. A

continuación, se presentan los resultados de estas pruebas:

Referencia SERGIO ANDRES PIEDRAHITA -
MONTELLANO - ALTO

Núm. de muestra COL1-611/07

Cultivo Grazed Grass (Cattle)

Fecha recibido 25/03/2024 (Date Issued: 28/03/2024)

Características del suelo	Resultado	Bajo	Normal	Alto
pH	5.3			
C.I.C. (meq/100g)	16.3			
Nutrientes principales	Resultado	Bajo	Normal	Alto
Fósforo (ppm)	79			
Potasio (meq/100g)	0.33			
Calcio (meq/100g)	6.78			
Magnesio (meq/100g)	2.14			
Sodio (meq/100g)	0.16			
Al Intercambiable (meq/100g)	0.45			
Fósforo (ppm)	91			
Nutrientes secundarios y micronutrientes	Resultado	Bajo	Normal	Alto
Azufre (ppm)	24			
Boro (ppm)	0.75			
Cobre (ppm)	12.9			
Hierro (ppm)	458			
Manganeso (ppm)	17			
Molibdeno (ppm)	0.02			
Zinc (ppm)	27.3			

Released by ...*Chris Lindley*... Laboratory Manager on behalf of Lancrop Laboratories

Figura 4. Análisis fisicoquímico de suelos Zona Alta, Montellano

El paso siguiente consistió en la selección de las materias primas necesarias para la elaboración del compost. En este sentido se buscó el aprovechamiento de subproductos o desechos generados en la operación ganadera y se realizó una clasificación en tres (3) categorías principales: (a) materiales ricos en nitrógeno (como desechos animales), (b) materiales vegetales verdes y (c) materiales leñosos altos en fibra.

Para los desechos animales, se seleccionaron las camas de las terneras, que contienen estiércol, heno y cascarilla de arroz. Estos materiales son fáciles de cargar debido a la conveniente ubicación de los corrales, que se encuentran en una zona elevada respecto al sitio de mezcla y armado de las pilas. En cuanto al material vegetal verde, inicialmente se probaron recortes de crisantemos provenientes de una empresa ubicada dentro de la finca; sin embargo, esta opción fue descartada debido al uso intensivo de agroquímicos durante el ciclo productivo de las flores. Finalmente, se optó por utilizar el pasto recién cortado del jardín de

la finca, que se guadaña una vez al mes. Este pasto se utiliza el mismo día en que se arman las pilas, ya que se encuentra fresco y en un tamaño picado, ideal para el proceso. En cuanto al material leñoso, se identificaron tres opciones: pilas de compost fallidas (aquellas que no alcanzaron las temperaturas necesarias para garantizar una buena calidad), heno desechado por las terneras y camas de terneras sobrantes almacenadas durante varios meses. De estas opciones, las pilas de compost fallidas resultaron ser la de mejor calidad.

Se empleó una técnica de producción denominada compostaje térmico aerobio, la cual consiste en asegurar, bajo la presencia de oxígeno, que la temperatura de la pila supere los 55 °C (y sostener esa temperatura durante tres días) para pasteurizar su núcleo y así eliminar posibles patógenos. Las materias primas se mezclaron siguiendo las proporciones indicadas en las recetas proporcionadas por SaBio y se ubicaron sobre estibas de madera (para permitir una adecuada circulación de aire por debajo de la pila). Es fundamental que las materias primas se disgreguen y corten de manera uniforme, añadiendo agua para alcanzar un nivel de humedad aproximado del 50 %. Además, la pila debe contar con una altura mínima de un metro para garantizar un proceso adecuado.

El proceso de cocción y maduración de cada pila tiene una duración aproximada de un mes y medio como mínimo, durante el cual se realiza el giro (“volteo”) de la pila en dos ocasiones. Diariamente, se monitoreó la temperatura en el centro de la pila utilizando un termómetro de compost y se estimó manualmente el nivel de humedad, adicionando agua para sostenerla en un nivel de 50% idealmente.

Los datos de temperatura y humedad se registraron mediante un asistente virtual de SaBio y con base en su evolución diaria, se determinó el momento adecuado para proceder con los volteos de la pila. SaBio proporciona retroalimentación específica sobre cada pila a

partir de las curvas de temperatura y humedad generadas, y al final del proceso analiza una muestra en su laboratorio para determinar la calidad microbiológica del compost.

En este caso específico se conformaron, entre los meses de marzo y octubre de 2024, un total de ocho (8) pilas de compost. Durante este proceso de aprendizaje se identificaron los siguientes aspectos para mejorar:

- No utilizar materia prima con altos niveles de residuos de agroquímicos, como tallos y flores de crisantemo.
- Construir pilas con una altura mayor a un metro.
- Emplear materias primas bien picadas y que no estén aglomeradas; estas deben ser desmenuzadas y trituradas adecuadamente, garantizando sean partículas finas y sueltas.
- Realizar una mezcla homogénea de las materias primas.

La pila de compost que arrojó los mejores resultados microbiológicos (según los análisis de laboratorio) fue la número cuatro (4). Por esta razón, se seleccionó esta pila como material base para replicar y producir bio líquidos en el biorreactor (el biorreactor emplea procesos aeróbicos en medio acuoso para multiplicar los microorganismos benéficos cultivados en las pilas de compost mientras que los bio líquidos generados en el biorreactor son de fácil aplicación mediante bombas aspersoras estacionarias en los potreros)

Durante el periodo de estudio se efectuaron las siguientes aplicaciones de enmiendas biológicas (hechas en la finca) siguiendo los protocolos impartidos por SaBio (ver Tabla 1)

Tabla 1. *Aplicaciones en Campo de enmiendas biológicas SaBio*

Fecha	Material aplicado	Cantidad	Potrero	Origen
21/06/24	bio líquido	400 lts	Cañero	pila 4
09/07/24	bio sólido	900 kg	Cañero	pilas 1,3y4
18/07/24	bio líquido	400 lts	Cañero	pila 4
08/08/24	bio líquido	400 lts	Cañero	pila 4
06/09/24	bio líquido	400 lts	Cañero	pila 4
12/09/24	bio sólido/bio líquido	900kg/250lts	Cañero	pilas4,5y6/pila4
11/10/24	bio líquido	400 lts	Cañero	pila 4
21/10/24	bio sólido/bio líquido	900kg/500lts	Cañero	pilas7y8/pila7

Fecha	Material aplicado	Cantidad	Potrero	Origen
17/06/24	bio líquido	300 lts	Rincon	pila 4
16/07/24	bio líquido	400 lts	Rincon	pila 4
06/08/24	bio líquido	400 lts	Rincon	pila 4
02/09/24	bio líquido	400 lts	Rincon	pila 4
08/10/24	bio líquido	400 lts	Rincon	pila 4

De acuerdo con los estándares de SaBio, los parámetros de calidad microbiológica para suelos, biosólidos (compost) y bio líquidos (producto del biorreactor) son los siguientes:

Hongos & Bacterias: Los productores, repartidores, ingenieros y médicos.

Estos valores son clave para entender la red alimenticia propia de cada tipo de planta y al ser "los primeros" en la red alimenticia son en gran medida un indicador del potencial nutritivo del suelo.

La relación Hongos:Bacteria (H:B) es el punto más clave de esta tabla y es dependiente del tipo de cultivo.

Diámetro medio de hongo:

- 0-1: insuficiente.
- 1-1.5: pequeño, no quiere decir que sea malo.
- 1.5-2: aceptable.
- 2-2.5: suficiente.
- <2.5: ideal.

Depredadores Benéficos: Policías, cocineros, constructores y reguladores.

Flagelados, amebas, nemátodos bacterianos, nemátodos fungívoros & nemátodos depredadores: Una de las funciones más importantes de estos organismos es que son depredadores en el suelo.

Al estar presentes facilitan el ciclo de los nutrientes, reemplazan el fertilizante.

<ul style="list-style-type: none">• Protozoos benéficos :<ul style="list-style-type: none">◦ 0 - 172638: inaceptable◦ 172638 - 863188: aceptable◦ 863188 - 1726375: bueno◦ <1726375: muy bueno• Flagelados:<ul style="list-style-type: none">◦ 0: inaceptable◦ 0-167705: aceptable◦ <167705: bueno	<ul style="list-style-type: none">• Amebas:<ul style="list-style-type: none">◦ 0: inaceptable◦ 0-167705: aceptable◦ <167705: bueno• Nematodos que se alimentan de bacterias<ul style="list-style-type: none">◦ 0: inaceptable◦ 175-350: bueno◦ <350: muy bueno	<ul style="list-style-type: none">• Nematodos que se alimentan de hongos<ul style="list-style-type: none">◦ 0: inaceptable◦ 175-350: bueno◦ <350: muy bueno• Nematodos depredadores<ul style="list-style-type: none">◦ 0: inaceptable◦ 175-350: bueno◦ <350: muy bueno
--	---	---

Potenciales perjudiciales: Saboteadores y problemáticos

- **Actinobacterias:** Este es un bioindicador que nos habla de condiciones donde comienza a presentarse bajos niveles de oxígeno, esto no quiere decir que por encontrarlo las cosas están mal. En ecosistemas como el suelo o el compost es natural y necesario que se den algunos espacios en donde se favorece el crecimiento de estos organismos. Dependiendo del cultivo pueden ser benéficos y necesarios como lo es el caso de las *Brassica* aunque para la mayoría de cultivos se considera perjudicial tener una alta biomasa.
- **Ciliados:** Estos organismos nos levantan una de las banderas rojas más significativas, son predominantes en ecosistemas sin oxígeno como aguas estancadas y suelos sin estructura. Son depredadores voraces y se acaban rápidamente las comunidades de bacterias en donde habitan.
- **Oomicetos:** La presencia de números elevados de estos organismos señala condiciones donde comienza a presentarse bajos niveles de oxígeno.
- **Biomasa Actinobacteria:**
 - 0-500: ideal.
 - 500-1000: aceptable.
 - <1000: inaceptable.

Figura 5. Parámetros de calidad microbiológica para suelos y enmiendas biológicas

La relación entre hongos y bacterias es fundamental y varía según el cultivo o ecosistema en estudio. Según los lineamientos de SaBio, para plantas herbáceas, pastos de alta productividad, céspedes y cultivos de hilera, la relación ideal entre hongos y bacterias es de 0,75:1 (ver Figura 6)

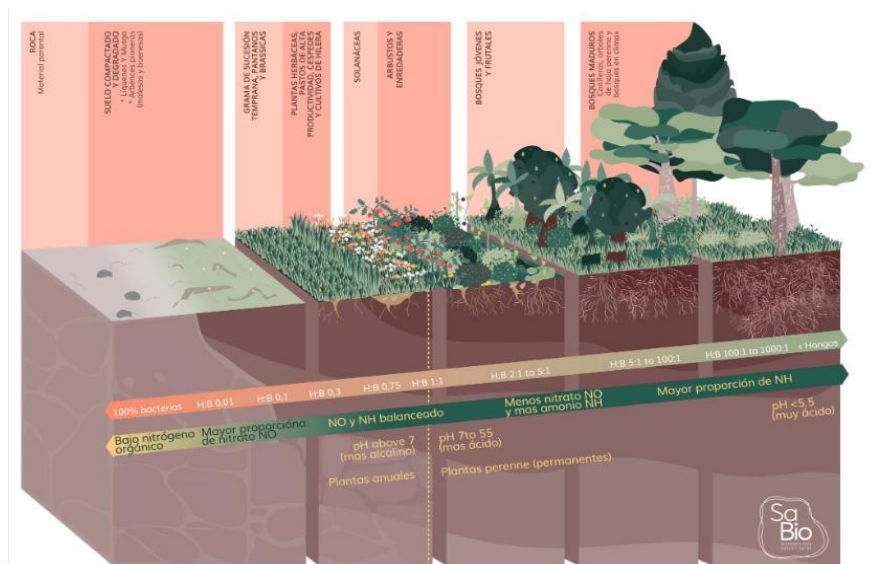


Figura 6. Parámetros microbiológicos y fisicoquímicos ideales para diferentes cultivos y ecosistemas

A continuación, se presentan los resultados de calidad microbiológica para las enmiendas biológicas de la finca Montellano (a partir de resultados de laboratorio de SaBio):

Tabla 2. Resultados laboratorio microbiología SaBio, enmiendas Finca Montellano

Tipo de muestra	Compost	Líquida	Mezcla
Nombre muestra	Pila 4	Bioreactor	sólidos/líquidos
Parámetro Microbiológico de Suelo	13/06/24	02/09/24	10/21/24
Relación Hongos:Bacterias	6.47	8.43	10.14
Biomasa Bacterias (ug/g)	3299	200	3440
Biomasa Fungica (ug/g)	33647	4110	53986
Diámetro medio hongos (um)	1.65	1.53	1.6
Biomasa actinobacterias (ug/g)	1898	287	1884
Biomasa oomicetos (ug/g)	3917	454	6055
Flagelados (#/g)	0	0	0
Ciliados (#/g)	0	0	0
Nematodos depredadores (#/g)	330	22	0
Amebas (#/g)	803880	56942	971355
Protozoos beneficios totales (#/g)	803880	56942	971355
Nematodos que comen bacterias (#/g)	660	22	550

Nematodos que comen hongos (#/g)	220	22	110
Nematodos que comen raices (#/g)	0	0	0

La evolución en la calidad microbiológica de los suelos, según los diferentes tratamientos experimentales y partiendo de la caracterización microbiológica realizada el 30/10/23 es la siguiente:

Tabla 3. *Resultados tratamiento: Testigo (fertilización y control de plagas convencional)*

Tipo de muestra	Suelo	Suelo	Suelo
Nombre muestra	Zona alta	Casa grande	Casa grande
Parámetro Microbiológico de Suelo	30/10/23	02/10/24	25/10/24
Relación Hongos:Bacterias	4.4	6.33	3.8
Biomasa Bacterias (ug/g)	2868	2344	3614
Biomasa Fungica (ug/g)	14665	18537	16490
Diámetro medio hongos (um)	1.23	1.44	1.37
Biomasa actinobacterias (ug/g)	462	585	721
Biomasa oomicetos (ug/g)	2325	0	1353
Flagelados (#/g)	0	0	0
Ciliados (#/g)	0	0	0
Nematodos depredadores (#/g)	0	0	0
Amebas (#/g)	77648	33495	66990
Protozoos beneficos totales (#/g)	77648	33495	66990
Nematodos que comen bacterias (#/g)	0	0	0
Nematodos que comen hongos (#/g)	0	0	0
Nematodos que comen raices (#/g)	0	0	0

Tabla 4. *Resultados Tratamiento: aplicación solo Bio líquidos*

Tipo de muestra	Suelo	Suelo	Suelo
Nombre muestra	Zona alta	Rincón 1	Rincón 1
Parámetro Microbiológico de Suelo	30/10/23	02/10/24	25/10/24
Relación Hongos:Bacterias	4.4	4.9	6.2
Biomasa Bacterias (ug/g)	2868	3461	2810
Biomasa Fungica (ug/g)	14665	19781	19864
Diámetro medio hongos (um)	1.23	1.36	1.36
Biomasa actinobacterias (ug/g)	462	571	395
Biomasa oomicetos (ug/g)	2325	0	0
Flagelados (#/g)	0	0	0
Ciliados (#/g)	0	0	0
Nematodos depredadores (#/g)	0	0	0
Amebas (#/g)	77648	50242	83738
Protozoos beneficos totales (#/g)	77648	50242	83738
Nematodos que comen bacterias (#/g)	0	0	0
Nematodos que comen hongos (#/g)	0	0	0
Nematodos que comen raices (#/g)	0	110	0

Tabla 5. *Resultados tratamiento: aplicación Biosólidos y Bioliquidos*

Tipo de muestra	Suelo	Suelo	Suelo
Nombre muestra	Zona alta	Cañero	Cañero
Parámetro Microbiológico de Suelo	30/10/23	02/10/24	25/10/24
Relación Hongos:Bacterias	4.4	5.26	3.93
Biomasa Bacterias (ug/g)	2868	4243	3310
Biomasa Fungica (ug/g)	14665	24057	14664
Diámetro medio hongos (um)	1.23	1.38	1.39
Biomasa actinobacterias (ug/g)	462	326	422
Biomasa oomicetos (ug/g)	2325	0	0
Flagelados (#/g)	0	0	0
Ciliados (#/g)	0	0	0
Nematodos depredadores (#/g)	0	110	0
Amebas (#/g)	77648	117232	100485

Protozoos beneficios totales (#/g)	77648	117232	100485
Nematodos que comen bacterias (#/g)	0	0	0
Nematodos que comen hongos (#/g)	0	0	0
Nematodos que comen raices (#/g)	0	0	0

ETAPA 2: DISMINUCIÓN DE USO DE AGROQUÍMICOS SINTÉTICOS

Ahorro en Agroquímicos Durante el Periodo de Estudio

Para analizar los ahorros obtenidos en agroquímicos durante el periodo de estudio (4 meses: del 17/06/2024 al 21/10/2024) en un área de 3.98 hectáreas, se toma como referencia los costos de agroquímicos utilizados comúnmente en la industria láctea de Colombia por hectárea y por mes.

Tabla 6. *Costos de Agroquímicos y Fertilizantes Convencionales por Hectárea/Mes*

Costos agroquímicos (hectárea/mes) ganadería leche convencional, octubre 2024				
Agroquímico/presentación	Tipo	Precio	dosis/hectarea	costo/hectarea
Insecticida (litro)	imidacloprid	\$ 78,000	200 cc	\$ 15,600
Fungicida (litro)	difenoconazole	\$ 77,800	200 cc	\$ 15,560
Coadyuvante (litro)	potenzol	\$ 28,500	200 cc	\$ 5,700
Fertilizante foliar (kilo)	pastos 5	\$ 18,600	500 g	\$ 9,300
Fertilizante edafico (bulto 50kg)	30N 8P 3K	\$ 126,000	220 kg	\$ 529,200
Total (hectarea/mes)				\$ 575,360

Ahorros Derivados del Uso de Enmiendas Biológicas SaBio

A partir de los valores anteriores y, tras aplicarse los tratamientos experimentales al área y la duración del estudio, se calcularon los ahorros en términos de reducción de agroquímicos y fertilizantes.

Tabla 7. Ahorros en Agroquímicos y Fertilizantes Convencionales Durante el Estudio

Ahorro en agroquímicos y fertilizantes convencionales en área y duración estudio SaBio (4 meses)			
Tratamiento	Agroquímicos (litros)	Fertilizantes (kilos)	Ahorros (\$ COP)
Rincon (Bio líquidos SaBio, 1.4 ha)	2.4	0	\$ 258,500
Cañero (Biosólidos y Bio líquidos SaBio, 1.18 ha)	2.4	440	\$ 1,466,790
Casa Grande (testigo, 1.4 ha)	0	0	\$ -
Ahorro total	4.8	440	\$ 1,725,290

Composición del Hato y Proyección de Ahorros

La finca Montellano, en octubre de 2024, cuenta con la siguiente composición de hato

Tabla 8. Composición del Hato, Finca Montellano (octubre 2024)

Estructura de Hato, Finca Montellano (octubre 2024)	Cantidad
Vacas en ordeño	38
Vacas horras	8
Terneritas y novillas de levante	14
Novillas de vientre	8
Total	68

El ganado lechero ocupa 10.5 hectáreas de potreros, mientras que el ganado seco y novillas (desde 8 meses de edad hasta el parto) ocupan 5 hectáreas. Esta composición de hato permite una producción diaria de leche entre 900 y 1,100 litros (dependiendo de las condiciones climáticas) y, a partir de la extrapolación de los resultados del tratamiento con mayor ahorro (\$310,760/ha/mes, correspondiente al campamento Cañero) se obtiene un ahorro mensual proyectado para la operación lechera de \$4,816,780.

Contexto Histórico en el Uso de Productos Biológicos

Desde octubre de 2020, Montellano adoptó el uso de productos biológicos para el control de plagas. Ese año se introdujo el uso del hongo *Beauveria bassiana*, efectivo contra insectos chupadores del pasto. Este hongo se utilizó junto con el insecticida químico sulfoxaflor (categoría toxicológica III, ligeramente peligroso). Para marzo de 2024, el hongo *Beauveria bassiana* estaba establecido en los potreros, eliminando la necesidad de aplicar insecticidas químicos. Este cambio permitió eliminar plaguicidas altamente peligrosos (categorías Ib y II) usados antes de 2020 y contribuyó a los buenos resultados observados en este estudio.

ETAPA 3: EVALUACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN Y ANALISIS

FINANCIERO

En el presente análisis se evalúan y comparan dos escenarios para la producción de pastos, base nutricional para la producción de leche en el trópico alto. En este contexto, se propone un modelo de ganadería regenerativa basado en la fertilización y control de plagas siguiendo los protocolos biológicos de SaBio, cuyo propósito en el aspecto económico es el de reducir los costos operativos, mejorar los flujos de caja y optimizar la sostenibilidad financiera del proyecto. Para respaldar la decisión de cambio, se analizan varios cursos de acción mediante herramientas financieras como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y los flujos de efectivo anuales. Se aplica una tasa de descuento del 17%, la cual refleja el costo de capital del proyecto y los riesgos asociados al sector.

Desglose de resultados por escenario:

1. Escenario bajo manejo convencional con agroquímicos (Modelo base):

Este escenario corresponde al esquema tradicional de fertilización y control de plagas con agroquímicos. Si bien los ingresos permanecen constantes, los altos costos operativos,

especialmente los costos fijos y los egresos deducibles de impuestos, limitan la capacidad del proyecto para generar valor (ver Tabla 9)

Tabla 9. *Flujo de caja bajo el manejo convencional con agroquímicos*

110								
111	8. Flujo de efectivo							
112	Flujo de caja sin financiamiento							
113	Descripción	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
114	(+) Ingresos por ventas		\$ 720,145,000.00	\$ 770,010,000.24	\$ 823,327,802.68	\$ 880,337,489.72	\$ 941,294,698.52	\$ 1,006,472,767.33
115	(-) Egresos deducibles de impuestos		\$ 688,180,880	\$ 688,180,880	\$ 688,180,880	\$ 688,180,880	\$ 688,180,880	\$ 688,180,880
116	(-) Costos fijos		\$ 541,214,480	\$ 541,214,480	\$ 541,214,480	\$ 541,214,480	\$ 541,214,480	\$ 541,214,480
117	(-) Costos Variables		\$ 146,966,400	\$ 146,966,400	\$ 146,966,400	\$ 146,966,400	\$ 146,966,400	\$ 146,966,400
118	(-) Gastos no desembolsables		\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667
119	(-) Depreciación		\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667
120	(-) Amortización		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
121	Utilidad Antes de impuestos		-\$ 28,702,547	\$ 21,162,454	\$ 74,480,256	\$ 131,489,943	\$ 192,447,152	\$ 257,625,221
122	(-) Impuestos 35%		-\$ 10,045,891	\$ 7,406,859	\$ 26,068,090	\$ 46,021,480	\$ 67,356,503	\$ 90,168,827
123	(=) Utilidad neta		-\$ 18,656,655	\$ 13,755,595	\$ 48,412,166	\$ 85,468,463	\$ 125,090,649	\$ 167,456,393
124	(+) Gastos no desembolsables		\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667
125	(-) Depreciación		\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667
126	(-) Amortización		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
127	(+) Ingresos no sujetos a impuestos		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
128	Valor de rescate de activos		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
129	Recuperación de capital de trabajo		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
130	(-) Egresos no deducibles de impuestos	\$ 364,000,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
131	Activos (terrenos, edificio y maquinaria)	\$ 364,000,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
132	Preoperativos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
133	Capital de trabajo	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
134	(=) Flujo de efectivo	-\$ 364,000,000	\$ 42,010,011	\$ 74,422,261	\$ 109,078,833	\$ 146,135,130	\$ 185,757,315	\$ 228,123,060
135	Flujo de efectivo acumulado	-\$ 364,000,000	-\$ 321,989,989	-\$ 247,567,727	-\$ 138,488,894	\$ 7,646,236	\$ 193,403,551	\$ 421,526,611
136		Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
137								
138								
139	Tasa de descuento (i) =		17%					
140	VAN (17%) =		\$ 46,020,249					
141	TIR =		20.62%					
142								

El análisis financiero arroja los siguientes resultados

- **VAN:** 46,020,249 COP, lo que indica que el proyecto es viable, aunque con márgenes limitados.
- **TIR:** 20.62%, cifra que supera la tasa de descuento del 17%, pero que no evidencia un rendimiento altamente competitivo.
- **Flujo de efectivo acumulado:** Permanece negativo hasta el cuarto año, lo que refleja dificultades en la recuperación inicial del capital invertido.

El esquema actual presenta una alta dependencia de fertilizantes y agroquímicos para el control de plagas, los cuales, además de ser costosos, implican un riesgo creciente debido a las fluctuaciones en los precios del mercado de insumos agrícolas. Esta situación incrementa la vulnerabilidad del proyecto frente a factores externos.

2. Escenario con fertilización y control de plagas usando enmiendas biológicas SaBio

(Modelo alternativo):

En este modelo se incorporan compost y líquidos microbianos fabricados con insumos disponibles en la finca (lo que permite generar ahorros significativos). Estos ahorros impactan directamente en la reducción de costos fijos y egresos deducibles de impuestos, resultando en una mejora sustancial de los resultados financieros (ver Tabla 10)

Tabla 10. *Flujo de caja bajo esquema de uso enmiendas SaBio y reduciendo el uso de agroquímicos*

Descripción	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
8. Flujo de efectivo							
Flujo de caja sin financiamiento							
(+) Ingresos por ventas		\$ 720,145,000.00	\$ 770,010,000.24	\$ 823,327,802.68	\$ 880,337,489.72	\$ 941,294,698.52	\$ 1,006,472,767.33
(-) Egresos deducibles de impuestos		\$ 688,180,880	\$ 674,790,032	\$ 665,541,420	\$ 665,541,420	\$ 665,541,420	\$ 665,541,420
(-) Costos fijos		\$ 541,214,480	\$ 527,823,632	\$ 518,575,020	\$ 518,575,020	\$ 518,575,020	\$ 518,575,020
(-) Costos Variables		\$ 146,966,400	\$ 146,966,400	\$ 146,966,400	\$ 146,966,400	\$ 146,966,400	\$ 146,966,400
(-) Gastos no desembolsables		\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667
(-) Depreciación		\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667
(-) Amortización		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Utilidad Antes de impuestos		-\$ 28,702,547	\$ 34,553,302	\$ 97,119,716	\$ 154,129,403	\$ 215,086,612	\$ 280,264,681
(-) Impuestos 35%		-\$ 10,045,891	\$ 12,093,656	\$ 33,991,901	\$ 53,945,291	\$ 75,280,314	\$ 98,092,638
(=) Utilidad neta		-\$ 18,656,655	\$ 22,459,646	\$ 63,127,816	\$ 100,184,112	\$ 139,806,298	\$ 182,172,043
(+) Gastos no desembolsables		\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667
(-) Depreciación		\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667	\$ 60,666,667
(-) Amortización		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(+) Ingresos no sujetos a impuestos		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Valor de rescate de activos		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Recuperación de capital de trabajo		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Egresos no deducibles de impuestos	\$ 364,000,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Activos (terrenos, edificio y maquinaria)	\$ 364,000,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Preoperativos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Capital de trabajo	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(-) Flujo de efectivo	-\$ 364,000,000	\$ 42,010,011	\$ 83,126,313	\$ 123,794,482	\$ 160,850,779	\$ 200,472,965	\$ 242,838,709
Flujo de efectivo acumulado	-\$ 364,000,000	-\$ 321,989,989	-\$ 238,863,676	-\$ 115,069,194	\$ 45,781,585	\$ 246,254,550	\$ 489,093,259
Tasa de descuento (i) =		17%					
VAN (17%) =		\$ 81,868,402					
TIR =		23.29%					

A continuación, se presentan los resultados de los principales criterios de evaluación económica:

- **VAN:** 81,868,402 COP (casi el doble del modelo base) lo que refleja un incremento considerable en el valor generado por el proyecto.
- **TIR:** 23.29%, lo que indica una rentabilidad más atractiva y una mayor capacidad para superar el costo de capital.

- **Flujo de efectivo acumulado:** Se torna positivo en el cuarto año, alcanzando 45,781,590 COP, lo que demuestra una mayor capacidad de recuperación de la inversión inicial.

Los resultados demuestran que el modelo con fertilización orgánica supera ampliamente al modelo base en términos de generación de valor y rentabilidad. Además, el flujo de efectivo acumulado evidencia una recuperación más temprana del capital invertido (ver Tabla 11 para efectos de comparación de resultados)

Tabla 11. *Comparación de indicadores financieros clave:*

Indicador	Modelo producción convencional	Modelo con protocolos SaBio
VAN (COP)	\$ 46,020,249	81,868,402
TIR (%)	20.62%	23.29%
Flujo acumulado al año 4	\$ 7,646,236	\$ 45,781,590

El cambio hacia la producción de biosólidos y bio líquidos con protocolos SaBio no solo disminuye la dependencia de insumos externos, reduciendo el riesgo asociado a la volatilidad del mercado de fertilizantes convencionales y agroquímicos, sino que también permite al proyecto alinearse con las tendencias de sostenibilidad. Además, responde a las demandas del mercado por productos obtenidos mediante prácticas agrícolas más ecológicas. Bajo este marco, y desde una perspectiva estratégica, el modelo basado en fertilización y control de plagas usando enmiendas biológicas (E2) ofrece una serie de beneficios adicionales:

- **Sostenibilidad:** La disminución en el uso de fertilizantes químicos no solo contribuye a la reducción de costos, sino que también mitiga el impacto ambiental del proyecto, haciéndolo más atractivo para mercados que valoran prácticas sostenibles.

- **Resiliencia financiera:** Al reducir la dependencia de insumos químicos, el proyecto se vuelve menos vulnerable a las fluctuaciones de precios en el mercado, mejorando su capacidad para enfrentar cambios externos.
- **Potencial de mercado:** El enfoque en fertilización orgánica permite posicionar el producto como una alternativa más sostenible, lo que puede generar oportunidades en mercados premium o en aquellos que exigen certificaciones ecológicas.

ETAPA 4: MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE INDICADORES CLAVE

En esta última etapa (análisis de indicadores) se incluyeron cuatro componentes principales: datos de campo, calidad del forraje, calidad de la leche y biología del suelo. Adicionalmente, se compararon diferentes estrategias de aplicación, organizadas en dos clústeres: (a) con SaBio (Campamento Cañero y Rincón 1) y (b) sin SaBio (Casa Grande).

Indicadores Analizados

- **Microbiológicos:** Hongos, bacterias, amebas, nemátodos y oomicetos.
- **Biológicos:** Lombrices y huevos de lombriz.
- **Físicos:** Compactación, estructura y profundidad del suelo.
- **Visuales:** Color, olor y agregación.
- **Funcionales:** Producción de hormonas y ciclos de carbono, nitrógeno y fósforo.

Introducción y Contexto Inicial

En octubre de 2023, se caracterizaron los suelos de la Finca Montellano desde un enfoque microbiológico para evaluar el impacto de tratamientos biológicos (SaBio) frente a fertilización y control de plagas convencional en la salud del suelo. El análisis se llevó a cabo en tres potreros: Campamento Cañero, Casa Grande y Rincón 1, con monitoreos de los

indicadores mencionados en tres períodos clave: agosto, inicio de octubre y finales de octubre de 2024.

El análisis inicial se realizó en una muestra conjunta para la zona de estudio denominada "Suelo productivo zona alta", recolectada el 30 de octubre de 2023 y sus resultados fueron los siguientes:

- Relación hongos-bacterias de 4.4, dominada por 14,665 $\mu\text{g/g}$ de hongos frente a una proporción menor de bacterias.
- Ausencia de organismos benéficos, como nemátodos depredadores y flagelados.
- Amebas en niveles aceptables pero bajos (77,648 organismos).
- Oomicetos en niveles de 2,325 $\mu\text{g/g}$, lo que indica presión de organismos no deseados.

Los lotes fueron divididos y sometidos a tratamientos diferenciados:

1. **Campamento Cañero:** Compost y bio líquidos (Sabio), con fertilización convencional a mitad de dosis (110 kg/ha).
2. **Casa Grande:** Fertilización y control de plagas convencional a dosis completa (220 kg/ha). Este es el tratamiento control.
3. **Rincón 1:** Fertilización convencional a dosis completa (220 kg/ha) con bio líquidos.

Es importante mencionar que las condiciones climáticas incluyeron un inicio y cierre húmedo, con un período seco intermedio, lo que permitió analizar el efecto combinado de tratamientos y clima.

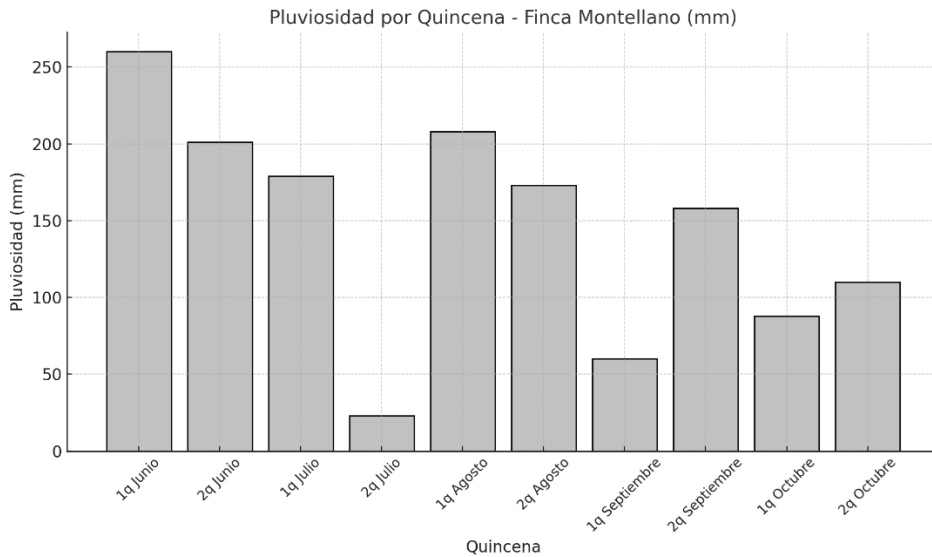


Figura 7. Pluviosidad registrada en Finca Montellano durante el estudio SaBio

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en términos de indicadores para el periodo de análisis

Resultados

Datos de Campo

- **Evaluación Visual del Suelo:** Campamento Cañero obtuvo las mejores puntuaciones en todas las medidas evaluadas, mientras que Casa Grande y Rincón 1 presentaron puntuaciones similares.
- **Lombrices y Huevos de Lombriz:** Hubo un aumento significativo en los lotes tratados con biológicos.
 - Lombrices:
 - Control (Casa Grande): 0.25 lombrices
 - Rincón 1: 1.6 lombrices
 - Campamento Cañero: 3.0 lombrices

- Huevos de Lombriz:
 - Control (Casa Grande): 0.5 huevos
 - Rincón 1: 2.3 huevos
 - Campamento Cañero: 2.4 huevos

Calidad del Forraje (medido en base de materia seca, laboratorio Dairy One Ithaca NY, muestra pastos tomada 2/10/24)

- **Contenido de Proteína:**

- Control (Casa Grande): 19.9%
- Rincón 1: 24.6% (+4.7 puntos)
- Campamento Cañero: 27.8% (+7.9 puntos)

- **Contenido de Fibra:**

- FDN (Fibra en Detergente Neutro):
 - Control: 60.8%
 - Rincón 1: 55.0%
 - Campamento Cañero: 54.8%
- FDA (Fibra en Detergente Ácido):
 - Control: 29.6%
 - Rincón 1: 27.3%
 - Campamento Cañero: 26.1%

- **Valor Alimenticio (NEL, RFV, %TDN):**
 - % TDN (nutrientes digeribles totales):
 - Control: 60%
 - Rincón 1: 61%
 - Campamento Cañero: 62%
 - RFV (valor relativo del forraje, índice sin unidades):
 - Control: 101
 - Rincón 1: 114
 - Campamento Cañero: 117
 - NEL (energía neta de lactancia, Mcal/Lb):
 - Control: 0.54
 - Rincón 1: 0.59
 - Campamento Cañero: 0.59

Calidad composicional de la Leche

En los lotes tratados con biológicos, se observó un aumento estadísticamente significativo en tres variables medidas:

- **Grasa:** 3.86% vs 3.42% (+0.44) → 12% de aumento.
- **Proteína:** 3.23% vs 3.03% (+0.20) → 6.6% de aumento.
- **Sólidos Totales:** 12.16% vs 11.65% (+0.51) → 4.37% de aumento.

Significancia Estadística

- **p < 0.001** para todos los componentes evaluados.
- **n = 236 muestras de leche totales** (laboratorio de leche Universidad de Antioquia, programa MHL, mejoramiento del hato lechero de Corpoleche).

Resultados Detallados por Lote

Campamento Cañero (tratamiento biosólidos y bio líquido)

- **Especies Detectadas:** 466, de ellas 170 son exclusivas.
- **Distribución de Hongos:**
 - 53% Mortierellomycota
 - 21% Ascomycota
- **Distribución de Bacterias:**
 - 37% Proteobacteria
 - 18% Acidobacteriota
- **Evolución Microbiológica:**
 - Relación hongos-bacterias:
 - Inicio (5 de agosto): 5.4 (19,800 µg/g de hongos y 3,016 µg/g de bacterias).
 - Final (25 de octubre): 3.93, con incremento notable de bacterias (4,000 µg/g).
 - Oomicetos:

- Inicio: 2,000 $\mu\text{g/g}$.
- Final: 0 $\mu\text{g/g}$, eliminados por completo.
- Amebas:
 - Permanecieron estables en 117,232 organismos, mostrando resiliencia.
- **Indicadores Biológicos:**
 - Lombrices: Incremento de 0 a 27 lombrices.
 - Huevos de lombriz: Incremento de 1 a 16, con 4 morfotipos diferentes.
- **Indicadores Físicos y Visuales:**
 - Compactación consistente en 30 cm.
 - Color, olor y agregación óptimos; puntuación constante de 1.
- **Calidad del Suelo:** Alta resiliencia, funcionalidad, biodiversidad y sostenibilidad.

Casa Grande (testigo sin aplicación de enmiendas biológicas)

- **Especies Detectadas:** 399, de ellas 68 son exclusivas.
- **Distribución de Hongos:**
 - 47% Mortierellomycota
 - 15% Ascomycota
- **Distribución de Bacterias:**
 - 34% Proteobacteria
 - 16% Acidobacteriota
- **Evolución Microbiológica:**

- Relación hongos-bacterias:
 - Inicio (5 de agosto): 7.7 (25,368 $\mu\text{g/g}$ de hongos y 2,745 $\mu\text{g/g}$ de bacterias).
 - Final (25 de octubre): 3.8, con mejoras asociadas al clima.
- Oomicetos:
 - Inicio: 1,870 $\mu\text{g/g}$.
 - Final: 1,353 $\mu\text{g/g}$, mostrando control limitado.
- Amebas:
 - Inicio: 66,990 organismos.
 - Intermedio: Descenso crítico a 33,495.
 - Final: Recuperación a 66,990 organismos.
- **Indicadores Biológicos:**
 - Lombrices: Incremento mínimo de 0 a 2 lombrices.
 - Huevos de lombriz: Incremento a 4 huevos en el muestreo intermedio, regresando a 0.
- **Indicadores Físicos y Visuales:**
 - Compactación reducida a 15-16 cm.
 - Color oscuro, olores fuertes, puntuación constante de 2.
- **Calidad del Suelo:** Resiliencia alta, sostenibilidad y biodiversidad medias.

Rincón 1 (aplicación de bio líquidos)

- **Especies Detectadas:** 492, de ellas 177 son exclusivas.

- **Distribución de Hongos:**
 - 44% Ascomycota

 - 24% Mortierellomycota

- **Distribución de Bacterias:**
 - 28% Proteobacteria

 - 18% Acidobacteriota

- **Evolución Microbiológica:**
 - Relación hongos-bacterias:
 - Inicio (5 de agosto): 5.62 (21,267 $\mu\text{g/g}$ de hongos y 2,959 $\mu\text{g/g}$ de bacterias).

 - Final (25 de octubre): 4.2, mostrando una mejora parcial.

 - Oomicetos:
 - Inicio: 1,766 $\mu\text{g/g}$.

 - Final: Reducción moderada, pero no eliminados.

 - Amebas:
 - Inicio: 66,990 organismos.

 - Final: Incremento a 78,543 organismos.

- **Indicadores Biológicos:**
 - Lombrices: Incremento de 0 a 14 lombrices.

- Huevos de lombriz: Incremento a 21 huevos, con 3-4 morfotipos.
- **Indicadores Físicos y Visuales:**
 - Compactación mejorada de 20 cm a 21.4 cm.
 - Problemas de anegación; puntuación cercana a 2.
- **Calidad del Suelo:** Alta resiliencia, biodiversidad muy alta, sostenibilidad baja.

Análisis Comparativo entre Clústeres

Definición de Clústeres

1. Clúster con Sabio:

- Compuesto por Campamento Cañero y Rincón 1.
- Tratamientos con microorganismos, compost y líquidos microbianos.
- Caracterizado por mayor diversidad, unicidad y funcionalidad.

2. Clúster sin Sabio:

- Compuesto por Casa Grande.
- Tratamiento basado en fertilización y control de plagas convencional.
- Presenta menor diversidad y funcionalidad en comparación con el clúster con Sabio.

Indicadores Comparativos

1. Riqueza de Especies:

- Clúster con Sabio: **723 especies.**
- Clúster sin Sabio: **399 especies.**

2. **Unicidad:**

- Clúster con Sabio: **392 organismos exclusivos.**
- Clúster sin Sabio: **68 organismos exclusivos.**

3. **Homogeneidad:**

- Clúster con Sabio: **235 especies compartidas** entre Campamento Cañero y Rincón 1.

4. **Distribución de Microorganismos:**

- **Hongos:**
 - Clúster con Sabio: Predominio de **Mortierellomycota** y **Ascomycota.**
 - Clúster sin Sabio: Menor diversidad en hongos.
- **Bacterias:**
 - Clúster con Sabio: Mayor proporción de **Proteobacteria** y **Acidobacteriota.**

5. **Ciclo de Nutrientes:**

- **Clúster con Sabio:**
 - Mayor eficiencia en la fijación de carbono, nitrógeno y fósforo.
 - Producción elevada de hormonas vegetales como **auxinas**, **citoquininas** y **ácido salicílico.**
- **Clúster sin Sabio:**
 - Dependencia de insumos químicos para completar ciclos básicos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los hallazgos presentados en la sección anterior y, teniendo en cuenta el objetivo general definido (elaboración de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano mediante un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos), se procede a continuación con el análisis de resultados para cada una de las etapas establecidas:

ETAPA 1: IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLOS DE PRODUCCIÓN DE BACTERIAS Y HONGOS Y DEPREDADORES BENEFICOS

Los resultados positivos alcanzados se debieron, en parte, a la correcta implementación de los protocolos establecidos por SaBio y al compromiso del equipo operativo en Montellano. Además, los suelos de la finca, gestionados durante casi noventa años bajo un sistema de pastoreo rotacional ganadero, demostraron un perfil óptimo en términos de macro y micronutrientes (según los análisis de suelo realizados en marzo de 2024 en la zona alta)

El ritmo de aplicación de las enmiendas biológicas (que contemplaba una aplicación de bio líquidos cada mes y una de biosólidos cada dos meses) resultó suficiente para la obtención de resultados positivos. Aunque sería ideal aumentar la cantidad y frecuencia de estas aplicaciones, las limitaciones relacionadas con la disponibilidad y el costo de la mano de obra impidieron este incremento.

El proyecto produjo tres tipos de enmiendas biológicas, las cuales se caracterizaron según su calidad microbiológica: (a) enmiendas sólidas (compost), (b) enmiendas líquidas (bio líquidos) y (c) una mezcla de ambas. De acuerdo con análisis realizados en el laboratorio

de SaBio, el biosólido (en específico la pila número cuatro) presentó la mejor calidad con una relación hongos:bacteria óptima para cultivos de pastos de alta productividad (0.75:1), valores de referencia de 6.47 y un diámetro de hongos de 1.65 μm .

En cuanto a los depredadores benéficos, los biosólidos (tanto solos como mezclados con bio líquidos) mostraron el mayor contenido de protozoos benéficos (971,355 y 803,880/g, respectivamente). Además, presentaron el mayor contenido de nematodos benéficos, con valores de 220/g (para los que se alimentan de hongos) 660/g (para los que se alimentan de bacterias) y 330/g (para los que se alimentan de depredadores).

Respecto al análisis de microorganismos potencialmente perjudiciales, los bio líquidos registraron las poblaciones más bajas (287 $\mu\text{g/g}$ de actinobacterias y 454 $\mu\text{g/g}$ de oomicetos). Cabe destacar que, en ninguno de los análisis de laboratorio realizados a las enmiendas biológicas o a los suelos, se detectó la presencia de ciliados, considerados los microorganismos depredadores más dañinos. Además, y aunque los biosólidos revelaron mayores cantidades de microorganismos potencialmente perjudiciales, su aplicación en el suelo del potrero Cañero no provocó un aumento significativo de estas poblaciones (lo que permitió concluir que esta enmienda – biosólidos – constituye la mejor alternativa)

Debe mencionarse, no obstante, que los biosólidos presentan dificultades de aplicación debido a su peso y volumen y que, si bien se dispone de un tractor con remolque para su transporte, el proceso de carga y distribución requiere un esfuerzo manual significativo por parte de los operarios (lo que justifica la necesidad de producir bio líquidos a partir de compost de alta calidad)

ETAPA 2: DISMINUCIÓN DE USO DE AGROQUÍMICOS SINTÉTICOS

El tratamiento experimental que presentó los mejores resultados en términos de calidad microbiológica de suelos, calidad bromatológica de pastos y calidad composicional

de la leche fue el aplicado en el potrero cañero, en el que se utilizaron biosólidos, bio líquidos y se redujeron a la mitad las dosis de fertilización edáfica convencional.

En la Tabla 6 se detalló el costo por hectárea/mes resultante bajo un manejo convencional de uso de agroquímicos para control de plagas (\$46,160/ha/mes) y fertilizantes edáficos (\$529,200/ha/mes) (Total: \$575,360/ha/mes). Además, se presentaron los egresos asociados al tratamiento experimental en el que no se emplearon agroquímicos para el control de plagas (reduciendo el uso de 0.6 litros de sustancias tóxicas por hectárea/mes) y se disminuyeron en un 50% las dosis de fertilizantes edáficos (110 kg/ha/mes). Esta estrategia generó un ahorro de \$310,760/ha/mes, lo que se tradujo en una reducción del 54 % en los costos de manejo de praderas (en comparación con el manejo convencional).

Cabe mencionar que el uso de fertilizantes edáficos para la nutrición de las plantas representa el 92 % del costo total de manejo de praderas. Bajo este marco, y reconociendo las consecuencias del aumento en los precios de estos insumos en el mercado nacional e internacional (se estima un aumento del 82% en los últimos años), el uso de los fertilizantes edáficos empleados en este estudio (\$126,000 por saco de 50 kg) resulta bastante favorable.

La siguiente tabla ilustra el impacto del precio y la intensidad de uso de fertilizantes edáficos bajo cuatro escenarios en Montellano. Adicionalmente, ilustra los beneficios derivados de los protocolos implementados junto a SaBio en términos de participación relativa (pues se logró reducir a la mitad el porcentaje de costos agroquímicos respecto al total de costos variables en la operación lechera)

Tabla 12. *Porcentaje de costos agroquímicos sobre costos variables totales en Montellano*

Manejo de Praderas	Precio Fertilizante	
	ene-22	oct-24
Convencional	30.2%	19.8%
SaBio	15.4%	10.2%

ETAPA 3: EVALUACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN Y ANALISIS

FINANCIERO

El análisis financiero del proyecto se basó en los costos reales de la operación lechera en Montellano para el año 2024, considerando un hato de cuarenta vacas en ordeño, valoradas en \$8,750,000 cada una. Bajo este escenario se calcularon unos costos variables anuales de \$541,214,480 y unos fijos de \$146,966,400.

Para efectos de evaluación se desarrollaron dos (2) modelos acotados para un periodo de seis (6) años. El primero correspondía al escenario de producción de pastos utilizando agroquímicos convencionales, y el segundo incorporaba la metodología SaBio, que permite reducir las tasas de fertilización al 30 % en el segundo año y al 50 % a partir del tercer año. Para el análisis se utilizó una tasa de descuento del 17 % específica para el sector agropecuario, basada en los datos actualizados de Damodaran (2024).

El análisis de rentabilidad, medido a través de los indicadores de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), evidenció mejores resultados en el segundo modelo (basado en la metodología SaBio). La reducción en el uso de agroquímicos convencionales contribuyó a que el VAN se mejorase en un 78 % (\$81,868,402 frente a \$46,020,249) y a que la TIR incrementase en 2.67 puntos porcentuales.

Como pudo verse, el modelo de producción con enmiendas SaBio se presenta como una alternativa más confiable, ya que reduce su dependencia de los precios volátiles de los agroquímicos convencionales. Además, destaca por su sostenibilidad tanto ambiental como financiera (pues este enfoque de producción con enmiendas biológicas permite mejorar la salud del suelo mediante el uso de insumos orgánicos existentes en la finca, alimentar las plantas de manera más eficiente y minimizar la necesidad de uso de insumos sintéticos externos)

ETAPA 4: MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE INDICADORES CLAVE

El análisis comparativo de indicadores (potrero Casa Grande tratado con fertilización y control de plagas mediante agroquímicos convencionales versus potrero Cañero, al que se le aplicaron bio-líquidos y bio-sólidos elaborados bajo los protocolos SaBio) a lo largo de la cadena trófica descrita (suelo, pasto, vaca, leche) demostraron que, al mejorarse la salud microbiológica del suelo, se nutre de manera más eficiente al pasto, se proporciona una mejor alimentación para las vacas y se obtiene una producción de leche de mayor calidad composicional.

Salud del Suelo

En cuanto a la salud del suelo, el potrero tratado con enmiendas SaBio finalizó el periodo de estudio con un promedio de 3.0 lombrices (conocidas como "ingenieras del suelo" pues desempeñan un papel crucial en la mejora de su estructura y oxigenación) y 2.4 huevos de lombriz por hueco excavado en el último muestreo (realizado en nueve huecos de 30 cm x 30 cm x 30 cm). En contraste, el potrero control presentó únicamente 0.25 lombrices y 0.50 huevos en promedio.

El mejoramiento estructural del suelo en el potrero tratado con SaBio se reflejó también en una reducción significativa de organismos indicadores de condiciones anaerobias

indeseables como los oomicetos, que pasaron de 2,325 $\mu\text{g/g}$ a cero (mientras que en el potrero control 1,870 $\mu\text{g/g}$ a 1,353 $\mu\text{g/g}$) y en la biodiversidad de microorganismos (hongos y bacterias), que alcanzó 466 especies identificadas (el potrero Casa Grande presentó 399).

Calidad del Forraje

Las mejoras en la estructura del suelo, el incremento de la biodiversidad microbiana y la disminución de microorganismos nocivos resultaron en un pasto más nutritivo. Esto se evidenció en los análisis bromatológicos realizados al final del estudio.

El índice de calidad de forraje, conocido como valor relativo del forraje (RFV, por sus siglas en inglés) que mide la calidad nutricional, confirmó estos hallazgos. Según Holland y Kezar (1990) los valores de RFV oscilan entre 51 puntos para forrajes de baja calidad (heno de trigo) y 164 puntos para forrajes de alta calidad (alfalfa antes de florecer). En este caso, el RFV del pasto del potrero tratado con enmiendas SaBio fue de 117 puntos mientras que el del potrero de control solo alcanzó 101 puntos del control (este resultado refleja un pasto con mayor contenido proteico, menor nivel de fibra y mayor energía)

Calidad de la Leche

La ganadería Montellano, pionera en el programa de Mejoramiento del Hato Lechero (MHL) liderado por el gremio lechero de Antioquia (Corpoleche), ha realizado controles mensuales de calidad de leche individual por vaca durante 47 meses. Para este estudio, se analizaron 236 muestras de leche, comparando la calidad composicional entre potreros (de manejo convencional versus tratados con enmiendas biológicas SaBio). Los resultados demostraron que la leche producida en potreros con enmiendas biológicas SaBio mejoró significativamente en sólidos totales (de 11.65% a 12.16%), grasa (de 3.42% a 3.86%) y proteína (de 3.03% a 3.23%). Lo anterior confirma que la mejora en la salud del suelo (al incrementar su biodiversidad microbiana), produce un pasto más nutritivo, y esto se

traduce por último en leche de mejor calidad composicional.

CONCLUSIONES

Una vez finalizado este trabajo de grado, el cual se centraba en el desarrollo de un estudio técnico y de costos de transición en el marco de la producción de pastos como base nutricional en una finca lechera del trópico alto colombiano (a partir de un enfoque que contempla la salud microbiana de suelos), es posible concluir que:

- Los protocolos de producción de enmiendas biológicas establecidos (bajo el apoyo de SaBio) resultan prácticos y de fácil implementación para la fertilización orgánica de pastos y el control de plagas en fincas lecheras del trópico alto colombiano. En este estudio en particular (realizado de febrero a octubre de 2024) se lograron grandes avances (capacitación del personal operativo, adecuación del sitio de producción de enmiendas, adquisición de equipos biorreactores, selección de materias primas) pues con la producción y aplicación de 4.650 litros de bio-líquidos y 2.700 kilogramos de bio-sólidos en las zonas definidas (clúster SaBio, potreros Cañero y Rincón) se mejoró significativamente tanto la biodiversidad microbiana en los suelos (se observó un aumento del 81% en la cantidad de especies de hongos y bacterias benéficas, con casi cinco veces más especies exclusivas respecto a los suelos manejados con agroquímicos convencionales) como la composición de la leche (presentó un incremento del 13% en el contenido de grasa y del 6.5% en el contenido de proteína respecto a la obtenida en potreros manejados con agroquímicos convencionales). Además, se evidenció una estable productividad del pasto en términos de volumen por unidad de área (se realizaron cinco aforos de pasto en los potreros tratados con enmiendas SaBio, obteniendo valores de 2.09, 1.54, 1.71, 2.07 y 2.17 kilogramos de pasto verde por metro cuadrado) lo que indica que la carga ganadera puede sostenerse en los mismos niveles que bajo el manejo agroquímico convencional.

- El tratamiento experimental que presentó los mejores resultados en términos de impacto positivo sobre la salud del suelo, la calidad bromatológica de los pastos y la composición de la leche fue el aplicado en el potrero Cañero. En este potrero se utilizaron bio-líquidos y bio-sólidos y se redujo en un 50% la fertilización edáfica convencional. Este escenario permitió, además de mejorar los indicadores de calidad mencionados, disminuir los costos de agroquímicos en un 54% (pasando de \$575,360 por hectárea/mes - referencia para el manejo convencional de pasturas en la región - a \$264,600 por hectárea/mes). Adicionalmente y gracias a que se evitó la aplicación de 4.8 litros de agroquímicos líquidos (insecticidas y fungicidas) y 440 kilogramos de fertilizantes edáficos convencionales se logró también un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental de la actividad lechera (contribuyendo a la preservación de fuentes hídricas y a la mejora de la salud del suelo).
- El análisis de la reducción de costos variables se complementó con un estudio financiero en el que se comparó el comportamiento de distintos indicadores entre dos modelos de producción de pastos: el primero, basado en un esquema convencional, y el segundo, bajo un esquema de uso de enmiendas biológicas producidas en la finca (modelo SaBio). Ambos modelos contemplaron una base de cuarenta vacas en ordeño (con una inversión inicial de \$ COP 364,000,000 destinada a la compra de ganado y un motocarro) y la estructura de egresos reales (fijos + variables) de 2024 en Montellano. El proyecto, que fue perfilado para una duración de seis años aplicando una tasa de descuento del 17% acorde con el sector agropecuario, arrojó un valor actual neto (VAN) de \$81,868,402 bajo el esquema Sabio (lo que representa un incremento del 78% en comparación con el esquema convencional) y una tasa interna de retorno (TIR) para el modelo SaBio del 23.29%, superando en 2.67 puntos porcentuales a la del modelo convencional. Este incremento en la rentabilidad

proyectada se debe, en gran medida, a la reducción del uso de fertilización edáfica convencional, cuyo uso se redujo en un 50% (desde 220 kilogramos a 110 kg por hectárea/mes).

- Durante el período de estudio, se llevaron a cabo tres jornadas de monitoreo intensivo en campo, evaluando indicadores en suelo, pastos y leche. A nivel edáfico, en los potreros tratados con enmiendas biológicas SaBio, se observó un incremento significativo en la población de lombrices y sus huevos, lo que contribuyó a mejorar la estructura del suelo y a la eliminación de oomicetos, microorganismos indicativos de condiciones anaerobias. En cuanto a la calidad bromatológica del pasto, el valor relativo del forraje (RFV) aumentó de 101 a 117 puntos tras la aplicación de bio-sólidos y bio-líquidos elaborados en la finca bajo los protocolos establecidos por SaBio. Como consecuencia de esta mejora en la alimentación del ganado, la composición de la leche mostró un incremento en los niveles de grasa (de 3.42% a 3.86%) y de proteína (de 3.03% a 3.23%). Cabe destacar que estas mejoras en los indicadores de calidad se lograron sin afectar la cantidad de pasto producido ya que los aforos realizados durante los cuatro meses de aplicaciones enmiendas biológicas (junio a octubre de 2024), arrojaron valores cercanos a dos kilogramos por metro cuadrado (cifra comparable a la obtenida bajo prácticas convencionales de manejo de pasturas).

REFERENCIAS

- Acoganar (Asociación Colombiana de Ganaderos Regenerativos) – Un lugar para Ganaderos Regenerativos. (n.d.). <https://acoganar.co/>
- Anja Bless (04 Sep 2024): The co-optation of regenerative agriculture: revisiting the corporate environmental food regime, *Globalizations*, DOI: 10.1080/14747731.2024.2397260
- Arias-Gómez, J., Villasís-Keever, M. Á., & Miranda Novales, M. G. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México*, 63(2), 201-206.
- Camacho de Baez, B. (2008). Metodología de la investigación científica: un camino fácil de recorrer para todos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. ISBN 958-660-082
- Cusworth, G., Lorimer, J., Brice, J., & Garnett, T. (2022). Green rebranding: Regenerative agriculture, future-pasts, and the naturalisation of livestock. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 47(4), 1009–1027.
<https://doi.org/10.1111/tran.12555>
- Damodaran, A. (2024). Datos sobre tasas de descuento y primas de riesgo por industria.
<http://pages.stern.nyu.edu/adamodar/>.
- De la lama, Paula & Zubirán, Marco & García, Alfredo. (2021). Los instrumentos de la investigación científica. Hacia una plataforma teórica que clarifique y gratifique. *Horizonte de la Ciencia*. 12. 189-202. 10.26490/uncp.horizonteciencia.2022.22.1078.
- FAO, ITPS, GSBI, CBD and EC. 2020. State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities, Report 2020. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>

- Feller, C., Aeschlimann, J., & Frossard, E. (2022). The contribution of Friedrich Albert Fallou to modern soil science. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(6), 766–772. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200306>
- Galloway, C., Swanepoel, P. A., & Haarhoff, S. J. (2024). A carbon footprint assessment for pasture-based dairy farming systems in South Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1333981>
- Hernández, R., & Mendoza, C. P. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw Hill.
- Holland, C., Kezar, W., Kautz, W.P., Lazowski, E.J., Mahanna, W.C. and Reinhart, R, “The pioneer forage manual. A nutritional guide,” *Pioneer Hi-Bred International*, 1990.
- Khangura, R.; Ferris, D.; Wagg, C.; Bowyer, J. Regenerative Agriculture—A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. *Sustainability* 2023, 15, 2338. <https://doi.org/10.3390/su15032338>
- McMillan, J. H. (2016). *Fundamentals for educational research* (7th ed.). Allyn and Bacon.
- Mesa, Carlos Eduardo. Comunicación personal en Finca Montellano, La Ceja, Antioquia, septiembre 16, 2024
- Newton P, Civita N, Frankel-Goldwater L, Bartel K and Johns C 2020 What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes *Frontiers in Sustainable Food Systems*
- Ortiz, J. Lifeder. (28 de febrero de 2020). Investigación exploratoria: tipos, metodología y ejemplos. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/investigacion-exploratoria/>.

de Oliveira, D.C., Maia, S.M.F., Freitas, R.d.A. *et al.* Changes in soil carbon and soil carbon sequestration potential under different types of pasture management in Brazil. *Reg Environ Change* 22, 87 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01945-9>

Pérez Godoy, M.C. 16 de Febrero, 2022, El precio de los insumos agrícolas en Colombia aumento 43% en enero de 2022. Agronegocios. Noticias, Tendencias y Oportunidades del Sector Agrícola |Agronegocios.co

Ramos-Galarza, C. Editorial: Los alcances de una investigación Julio – Diciembre de 2020 <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>

Rusu, C. (2011). Metodología de la Investigación. *Recuperado el, 19, 2011.*

Stewart, L. (2024, November 20). *Investigación Exploratoria | Definición, Cómo Llevarla a cabo y Ejemplos.* ATLAS.ti. <https://atlasti.com/es/research-hub/investigacion-exploratoria>

Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago

III Reunión Interamericana de Fitogenetistas, Fitopatólogos, Entomólogos y Edafólogos, Bogotá DE, Colombia, 20 de Junio al 1ero de Julio 1955. Ministerio de Agricultura Colombia, Dpto de Investigación Agropecuaria, Oficina de Investigaciones Especiales 1958

Revista Semana, Redacción economía, 9 de Marzo 2024 Semana.com - Últimas Noticias de Colombia y el Mundo

Rodríguez Puerta, A. Liferder. (4 de marzo de 2020). Investigación cuantitativa: características, técnicas, ejemplos. Recuperado de: <https://www.liferder.com/investigacion-cuantitativa>.

SABIO. (n.d.). SaBio. Recuperado Octubre 21, 2024, desde <https://simbiosis.sabio.com.co/>

SAS, P., & SAS, P. (2024, Junio 11). *Análisis del precio de la urea en Colombia*.

Proquivetsas. https://proquivetsas.com/precio-de-la-urea-en-colombia/?expand_article=1

Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., & Torres, C. P. M. (2014).

Metodología de la investigación

Smith, A. P., Metcalf, A. L., Metcalf, E. C., Yung, L., Swinger, B., Cummins, T. M., Chaffin,

B. C., Shuver, A., & Slattery, D. (2024). U.S. beef producer perspectives on

“sustainable beef” and implications for sustainability transitions. *Discover*

Sustainability, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00253-y>

Sordo, Jorge Ancizar. El empobrecimiento de los suelos en Colombia y sus repercusiones en

la ganadería, *Revista Facultad Nacional de Agronomía Vol 4 (14-15) pp 1502-1512.*

1941

TECHNICAL NOTE 721 April 2019 • ELEC

Soil Biodiversity and Soil Health

Bryan Griffiths, SRUC Chris McDonald, SAC Consulting Mary-Jane Lawrie, SAC Consulting

Production of this SRUC Technical Note was funded by the Scottish Government as part of its

Farm Advisory Service.

UNCCD 2022 Summary for Decision Makers (Global Land Outlook) 2nd edn

Vázquez Pérez, J. (7 de Marzo 2024) Enfoque cuantitativo y sus diseños: descripciones,

aplicaciones y procesos, Ph.D. Profesor de la Facultad de Educación UPR-RP

Programa Graduado en Investigación y Evaluación Educativa

Zhang, R., Han, Z., Lu, Q., Wang, K., Chen, Y., Cong, W.-F., Zhang, F. *Harnessing biodiversity for healthy dairy farms*. (2022) *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 9 (2), pp. 238-244.