UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

CARRERA DE AGROPECUARIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

"RELACIÓN ENTRE LA SALUD EDÁFICA DEL SUELO EVALUADA CON CROMATOGRAFÍA Y LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA EN EL CANTON PUJILÍ"

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniera Agropecuaria

Autora:

Mariscal Miñarcaja Melany Daniela

Tutor:

Molina Guasapaz. Edie Gabriel

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto - 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Mariscal Miñarcaja Melany Daniela con cédula de ciudadanía No. 1756095459, declaro ser autora del presente Proyecto de Investigación: **"RELACION ENTRE LA SALUD EDÁFICA DEL SUELO EVALUADA CON CROMATOGRAFÍA Y LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA EN EL CANTON PUJILÍ"**, siendo el Médico Veterinario Mtr. Edie Gabriel Molina Cuasapaz, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 6 de agosto del 2026

Melany Daniela Mariscal Miñarcaja
C.C: 1756095459
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTORA

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **MARISCAL MIÑARCAJA MELANY DANIELA**, identificada con cédula de ciudadanía **1756095459** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - LA CEDENTE es una persona natural estudiante de la carrera de Agropecuaria, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **"RELACION ENTRE LA SALUD EDÁFICA DEL SUELO EVALUADA CON CROMATOGRAFÍA Y LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA EN EL CANTON PUJILÍ"**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2022 - Marzo 2023

Finalización de la carrera: Abril 2026 – Agosto 2026

Tutor: Mvz. Edie Gabriel Molina Cuasapaz, Mtr.

Tema: **"RELACION ENTRE LA SALUD EDÁFICA DEL SUELO EVALUADA CON CROMATOGRAFÍA Y LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA EN EL CANTON PUJILÍ"**

CLÁUSULA SEGUNDA. - LA CESIONARIA es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
b) La publicación del trabajo de grado.
c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 6 días del mes de agosto de 2026.

Melany Daniela Mariscal Miñarcaja	Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CEDENTE	**LA CESIONARIA**

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el título:

"**RELACION ENTRE LA SALUD EDÁFICA DEL SUELO EVALUADA CON CROMATOGRAFÍA Y LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA EN EL CANTON PUJILÍ**", de Mariscal Miñarcaja Melany Daniela, de la carrera de Agropecuaria, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 6 de agosto del 2026

Mvz. Edie Gabriel Molina Cuasapaz, Mtr.
C.C: 1722547278
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, la postulante: Mariscal Miñarcaja Melany Daniela, con el título del Proyecto de Investigación: **"RELACION ENTRE LA SALUD EDÁFICA DEL SUELO EVALUADA CON CROMATOGRAFÍA Y LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA EN EL CANTON PUJILÍ"**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 6 de agosto del 2026

Ing. Clever Castillo de la Guerra, MSc.
C.C: 0501715494
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Ing. Cristian Santiago Jiménez Jácome, Mg.
C.C: 0501946263
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Mvz. Cristina Isabel Bejarano, Mg.
C.C: 1802458651
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a Dios por darme salud y fortaleza para cumplir esta etapa tan importante de mi vida, también agradezco profundamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi por permitirme formarme como profesional con ayuda de todo el personal docente , a mi tribunal por los aportes y correcciones para que esta investigación culmine de la mejor manera finalmente al Dr. Edie Gabriel Molina Cuasapaz por su tiempo, paciencia, orientación y apoyo gracias por compartir sus conocimientos, resolver mis dudas y brindarme la confianza necesaria para culminar esta investigación.

Melany Daniela Mariscal Miñarcaja

DEDICATORIA

Al culminar esta etapa tan importante de mi vida quiero dedicar este trabajo a Dios por darme fortaleza y sabiduría, a mis padres Cristian Mariscal y Marlene Miñarcaja por ser el pilar fundamental de mi vida, por el esfuerzo, amor y dedicación que hacen todos los días para que pueda cumplir cada una de mis metas gracias por acompañarme y estar siempre conmigo.

A mis hermanas Angie Mariscal y Margarita Mariscal por ser mis compañeras de vida y estar para mí en todo momento gracias por los consejos y palabras de aliento que muchas veces me salvaron.

A mi abuelita luz y mi tía Amparito por ser mis consejeras de vida les agradezco por todo el amor y comprensión.

A mis mascotas maya y milo porque aunque no puedan hablar su cariño y compañía también me ayudaron a seguir adelante.

Finalmente, a Isaías y Margarita, quienes hicieron que esta etapa universitaria no fuera tan difícil. Gracias por compartir conmigo tantos momentos de alegría y aprendizaje que hicieron de este camino una experiencia inolvidable.

Melany Daniela Mariscal Miñarcaja

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: "RELACION ENTRE LA SALUD EDÁFICA DEL SUELO EVALUADA CON CROMATOGRAFÍA Y LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA EN EL CANTON PUJILÍ".

Autora:
Mariscal Miñarcaja Melany Daniela

RESUMEN

La producción lechera familiar del cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi, depende en gran medida de la calidad del suelo para sostener su productividad forrajera; sin embargo, el sobrepastoreo y el pisoteo bovino han acelerado su deterioro, elevando los costos de suplementación y generando pérdidas económicas a los pequeños productores. Ante la falta de herramientas accesibles para evaluar la salud del suelo, esta investigación tuvo como objetivo determinar la relación entre la salud edáfica evaluada mediante cromatografía de Pfeiffer y la sostenibilidad de los sistemas de producción lechera familiar. El estudio se desarrolló bajo un diseño no experimental, correlacional y de enfoque mixto, en 14 unidades productivas vinculadas al proyecto DIRGI_CP2021-003. Se caracterizó la salud edáfica mediante cromatografía circular de Pfeiffer, un diagnóstico accesible y de bajo costo, y se registró la producción de biomasa forrajera de cada predio. Los resultados muestran que la mayoría de los suelos analizados presenta una condición intermedia de salud edáfica, con un grupo con baja actividad microbiológica y otro con fertilidad biológica media-alta, patrones que resultan coherentes con las diferencias de biomasa forrajera registradas entre unidades productivas. La producción de leche registrada entre las 14 unidades productivas presentó una alta variabilidad entre productores, reflejando que la productividad lechera en el cantón Pujilí está condicionada por múltiples factores simultáneos de manejo zootécnico que van más allá de la condición edáfica. El análisis estadístico no evidenció una asociación significativa entre la salud del suelo evaluada mediante cromatografía de Pfeiffer y la producción lechera, resultado atribuible principalmente al reducido tamaño muestral y a la influencia de variables no controladas.

Palabras clave: salud del suelo, cromatografía de Pfeiffer, sostenibilidad, producción lechera, biomasa forrajera.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

THEME: "RELATIONSHIP BETWEEN SOIL HEALTH ASSESSED BY CHROMATOGRAPHY AND THE SUSTAINABILITY OF DAIRY PRODUCTION SYSTEMS IN PUJILÍ CANTON"

Author:
Mariscal Miñarcaja Melany Daniela

ABSTRACT

Family-based dairy production in Pujilí canton, Cotopaxi province, largely depends on soil quality to sustain forage productivity; however, overgrazing and cattle trampling have accelerated soil degradation, raising supplementation costs and causing direct economic losses for small producers. Given the lack of accessible tools for assessing soil health, this research aimed to determine the relationship between soil health, assessed through Pfeiffer chromatography, and the sustainability of family dairy production systems. The study followed a non-experimental, correlational design with a mixed approach, carried out on 14 production units linked to the DIRGI_CP2021-003 project. Soil health was characterized using Pfeiffer circular chromatography, an accessible and low-cost diagnostic tool, and forage biomass production was recorded for each farm. The results show that most of the soils analyzed presented an intermediate soil-health condition, with one group showing low microbiological activity and another showing medium-to-high biological fertility, patterns that were consistent with the differences in forage biomass recorded among production units. Milk production recorded across the 14 production units showed high variability among producers, reflecting that dairy productivity in Pujilí canton is conditioned by multiple simultaneous zootechnical management factors beyond soil condition. The statistical analysis did not show a significant association between soil health, as assessed by Pfeiffer chromatography, and milk production, a result mainly attributable to the small sample size and the influence of uncontrolled variables.

Keywords: Soil health, Pfeiffer chromatography, sustainability, dairy production, forage biomass.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA ii

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTORA iii

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN v

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN vi

AGRADECIMIENTO vii

DEDICATORIA viii

RESUMEN ix

ABSTRACT x

1. INFORMACIÓN GENERAL 1

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO 2

3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO 3

4. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 3

5. OBJETIVOS: 5

5.1. General 5

5.2. Específicos 5

6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS 5

7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA 6

7.1. Salud edáfica del suelo 6

7.1.1. Definición y concepto de la salud del suelo 6

7.1.2. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo 7

7.1.3. Indicadores de calidad del suelo 8

7.1.4. Degradación del suelo en zonas de producción lechera 8

7.1.5. Erosión del suelo en sistemas ganaderos 9

7.2. Cromatografía de Pfeiffer 10
7.2.1. Fundamento teórico del método Ehrenfried Pfeiffer 10
7.2.2. Principio Químico: Reacción con Hidróxido de Sodio e Impregnación con Nitrato de Plata 11
7.2.3. Interpretación de los cromatogramas 11
7.2.4. Zonas de lectura diferenciadas en el cromatograma de Pfeiffer 12
7.2.5. Ventajas del uso de la cromatografía circular de Pfeiffer 22
7.3. Sistemas de Producción lechera 22
7.3.1. Tipología de Sistemas Ganaderos Intensivo, Semi-intensivo y Pastoreo 22
7.3.2. Características de la ganadería en la sierra ecuatoriana 23
7.3.3. Producción lechera en el cantón de Pujilí y la provincia de Cotopaxi 24
7.3.4. Costos de producción lechera 25
7.4. Relación Suelo–Planta–Animal 26
7.4.1. Nutrición Mineral del suelo y calidad del forraje 26
7.4.2. Impacto de la Compactación y Materia Orgánica en la Producción lechera 26
8. VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS 27
9. METODOLOGÍA Y ANALISIS ESTADISTICO 27
9.1. Metodología 27
9.1.1. Área de estudio 27
9.1.2. Unidades de producción consideradas en el área de estudio 28
9.1.3. Método de muestreo de suelo 28
9.1.4. Metodología de la cromatografía de Pfeiffer 29
9.1.5. Metodología de la biomasa del forraje 32
9.2. Análisis Estadístico 34
9.2.1. Análisis estadístico por objetivo específico 34

10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 37
10.1. Resultados generales 37
10.1.1. Interpretación cromatográfica por conglomerados 37
10.1.2. Resultados Biomasa Forrajera 38
10.1.3. Resultados producción de leche 41
10.2. Resultados de análisis estadísticos 42
10.2.1. Resultados de análisis estadísticos por conglomerados 42
10.2.2. Resultados de análisis estadísticos disponibilidad de biomasa forrajera (MS) por conglomerado de suelo 47
10.2.3. Resultados de análisis estadísticos Relación entre el conglomerado de suelo y la producción de leche 50
10.2.4. Relación entre el conglomerado de suelo y la producción de leche 51
10.3. Discusión de resultados 52
10.3.1. Caracterización de la salud edáfica 52
10.3.2. Relación entre suelo y disponibilidad de biomasa forrajera 53
10.3.3. Relación entre los tipos de forraje utilizados 55
10.3.4. Relación entre el conglomerado de suelo y la producción de leche 55
11. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS) 56
12. PRESUPUESTO DEL PROYECTO 57
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 58
14. BIBLIOGRAFÍA 59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro de actividades en relación a los objetivos planteados. 5
Tabla 2. Interpretación de la zona central o de estructura de suelo 17
Tabla 3. Interpretación de la zona interna o zona mineral 17
Tabla 4. Interpretación de la zona intermedia o zona proteica 19
Tabla 5. Interpretación de la zona interna o zona mineral 20
Tabla 6. Manejo de suelos con diferentes sistemas de producción 21
Tabla 7. Unidades de producción del área de estudio 28
Tabla 8. Conglomerado 1 - Zona central 37
Tabla 9. Conglomerado 2 - Zona interna 37
Tabla 10. Conglomerado 3- Zona intermedia 37
Tabla 11. Conglomerado 4 - Zona externa 38
Tabla 12. Resultados Biomasa Forrajera 38
Tabla 13. Producción de leche diaria por unidad productiva 41
Tabla 14. Perfil y tamaño de los conglomerados generales de suelo (n = 42 parcelas) 42
Tabla 15. Presupuesto del proyecto de investigación. 57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Identificación de las Zonas de un Cromatograma para su Interpretación ..14

Figura 2. Identificación de las zonas con diámetro ideal de un cromatograma para su interpretación 15

Figura 3. Identificación de las zonas con diámetro de un cromatograma para su interpretación 16

Figura 4. Dendrograma de la Zona Central. 43

Figura 5. Dendrograma de la Zona Interna.....43

Figura 6. Dendrograma de la Zona Intermedia.....44

Figura 7. Dendrograma de la Zona Externa. 45

Figura 8. Dendrograma general del suelo.....45

Figura 9. Distribución de la salud edáfica por potrero, cantón Pujilí (n = 42). 46

Figura 10. Porcentaje acumulado de potreros por conglomerado 47

Figura 11. Estadísticos descriptivos de MS (kg) por conglomerado de suelo.....47

Figura 12. Dendograma General – Caracterización de Suelo 48

Figura 13. Biomasa forrajera por conglomerado. 49

Figura 14. QQ-plots de normalidad de la MS. 50

Figura 15. Producción de leche por conglomerado. 51

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

Relación entre la salud edáfica del suelo evaluada con cromatografía y la sostenibilidad de sistemas de producción lechera en el cantón Pujilí

Fecha de inicio: abril 2026

Fecha de finalización: agosto 2026

Lugar de ejecución: Pujilí – Cotopaxi

Facultad que auspicia: Facultad de ciencias agropecuarias y recursos naturales.

Carrera que auspicia: Carrera de Agropecuaria.

Equipo de Trabajo:

Estudiante: Melany Daniela Mariscal Miñarcaja

Coordinador del Proyecto:

Tutor: Mvz. Edie Gabriel Molina Guasapaz, Mtr.

Correo: edie.molina7278@utc.edu.ec

Área de Conocimiento: 3109.02 Ciencias Agrarias, Ciencias Veterinarias, Genética

Línea de investigación: Análisis, conservación y aprovechamiento racional de la biodiversidad, fauna y recursos naturales para el desarrollo sustentable y la prevención de desastres naturales

Sublinea de investigación: Producción animal

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La producción lechera familiar en el cantón Pujilí, depende directamente de la calidad del suelo para sostener su productividad forrajera, sin embargo, el deterioro edáfico provocado por el sobrepastoreo y el pisoteo bovino, ha reducido la disponibilidad de pasto, elevado los costos de suplementación y generado pérdidas económicas directas al productor. Ante esta realidad, se necesitan herramientas técnicas que permitan evaluar la salud del suelo de manera accesible y oportuna, sin depender de los análisis convencionales de laboratorio que resultan costosos y de difícil acceso para el pequeño ganadero (Barros & Franco, 2022).

Es por esta razón que los pequeños campesinos necesitan contar con criterios cualitativos sencillos que les permitan conocer la salud de su suelo, es decir, la presencia o ausencia de materia orgánica; actividad microbiológica; componentes minerales y enzimáticos; su estructura y nivel de degradación. La instalación y uso en el campo de la cromatografía circular de Pfeiffer y análisis de suelo (crop and soil analysis) es más económica comparado a análisis más comunes, ya que puede ser aplicada directamente en campo por productores, técnicos y estudiantes, sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados para interpretar sus resultados (Cruz et al., 2023).

Mediante la correlación de los cromatogramas obtenidos con la biomasa forrajera producida y los costos de producción por litro de leche, se logrará identificar qué unidades productivas presentan mayor grado de degradación edáfica y cuáles mantienen condiciones favorables para la producción, logrando así implementar prácticas de recuperación del suelo como la rotación de potreros, la reducción de carga animal y el uso de abonos orgánicos(Hernández et al., 2025) Para que así los productores de Pujilí puedan llegar a sistemas ganaderos más sostenibles y rentables.

3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Directos: Productores vinculados al proyecto DIRGI_CP2021-003. Implementación del programa de mejoramiento genético sostenible de bovinos de leche de la provincia de Cotopaxi

Indirectos: Productores de leche bovina de la Provincia de Cotopaxi

Investigadora principal requisito previo a la obtención del título de ingeniera agropecuaria

4. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En el cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi, que es la cuarta productora de leche del país después de Chimborazo, Cañar y Pichincha. (Primicias, 2022), la actividad lechera es la principal fuente de ingreso de cientos de pequeñas familias (Naranjo, 2024) registró que en la provincia se encuentran 72 productores y 307 cabezas de ganado vacuno, no obstante el autor menciona que este registro corresponde a una parte de los productores existentes alrededor de las parroquias del cantón, con una producción promedio diaria por unidad productiva de 8,36 kg, y hatos de apenas dos a cuatro vacas. A escala provincial el 80,87% de los productores de Cotopaxi mantiene entre uno y cinco bovinos en predios de 0,5 a 1 hectárea, configurando un sistema minifundista de subsistencia con escaso nivel de tecnificación y alta dependencia de la calidad del suelo para sostener la producción forrajera (Franco et al., 2019).

El sobrepastoreo y el pisoteo constante del ganado es una de las principales limitantes que afecta tanto a la productividad como la sostenibilidad de los sistemas ganaderos generando alteraciones y daños en el suelo ya que esto constituye una de las principales causas de degradación de los pastizales lo que reduce significativamente la cobertura vegetal, limita la capacidad de rebrote y favorece la compactación del suelo, disminuyendo así la infiltración de agua, la aireación y el desarrollo radicular de las especies forrajeras, como consecuencia esto reduce tanto la disponibilidad como la calidad del forraje para la alimentación del ganado. (Jurado et al., 2021; Polanía et al., 2021)

Al disminuir la producción de forrajes, los productores ven la necesidad de comprar suplementos nutricionales externos para mantener a sus ganados. Un estudio realizado con pequeños ganaderos de Sigchos cantón vecino con con

diciones similares a las de Pujilí, determinó que el costo real de producción del litro de leche es de $0,43 mientras que el precio oficial de compra al productor es de $0,42, generando un déficit de $16,80 por productor y un margen de pérdida del 2,8%. Esto implica que por cada litro de leche que produce el pequeño ganadero, pierde dinero, situación que empeora cuando los suelos degradados obligan a incrementar la suplementación externa. (Cevallos Polanco et al. 2021). Esta presión económica, por su parte, induce al productor a incrementar la carga animal para compensar sus pérdidas, acelerando el sobrepastoreo y profundizando la degradación del suelo.

Para revertir esta dinámica es indispensable evaluar la calidad del suelo, sin embargo, los análisis de laboratorio convencionales son inalcanzables para la mayoría de productores familiares, ya que necesitan equipamiento especializado, mano de obra calificada y tiempos de respuesta largos (Medina et al., 2018). Las prácticas agroecológicas necesitan métodos que permitan a los agricultores evaluar la salud de sus suelos. Por lo tanto, La cromatografía de Pfeiffer es una herramienta de diagnóstico con un método sencillo y de bajo costo, cuyos resultados permiten diferenciar con claridad los suelos más sanos de los degradados (Barros & Franco, 2022) y con ello poder diseñar estrategias de manejo sostenibles para los suelos.

5. OBJETIVOS:

5.1. General

Determinar la relación entre la salud edáfica del suelo evaluada mediante cromatografía y la sostenibilidad de sistemas de producción lechera en el cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi.

5.2. Específicos

- Caracterizar la salud edáfica del suelo mediante cromatografía de Pfeiffer en sistemas de producción lechero familiar en el cantón Pujilí.

- Correlacionar los patrones de salud edáfica del suelo con la biomasa de forraje en los sistemas de producción lechero familiar

- Relacionar la salud edáfica del suelo con los indicadores de sostenibilidad económica de los sistemas de producción lechero familiar.

6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 1. *Cuadro de actividades en relación a los objetivos planteados.*

OBJETIVOS	ACTIVIDADES	MÉTODOLOGÍA	RESULTADOS
Caracterizar la salud edáfica del suelo mediante cromatografía de Pfeiffer en sistemas de producción lechero familiar en el cantón Pujilí.	-Recolección de muestras de suelo en zonas de pastoreo. -Preparación de muestras para análisis. -Realización de cromatogramas de Pfeiffer. -Interpretación de	-Método de Cromatografía de Pfeiffer. -Protocolo estandarizado de cromatografía de Pfeiffer. -Análisis cualitativo de cromatogramas (zonas, colores, patrones)	-Salud edáfica del suelo (Excelente, Buena, regular, pobre)

	patrones cromatográficos.		
Correlacionar los patrones es de salud edáfica del suelo con la biomasa de forraje en los sistemas de producción lechero familiar.	- Evaluación de la producción de biomasa de pastos.	-Cuadrantes de muestreo para materia verde. -Proceso de deshidratación para materia seca.	-Producción de biomasa kg/h. -Correlación entre la salud edáfica y la biomasa.
Relacionar la salud edáfica del suelo con la producción de leche.	-Medición de producción de leche.	-Pesaje de leche dúrate cada ordeño para obtener producción total diaria.	-Producción de leche por vaca.

Elaborado por: (Mariscal, 2026)

7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

7.1. Salud edáfica del suelo

7.1.1. Definición y concepto de la salud del suelo

El suelo es uno de los recursos que más valiosos tiene la naturaleza para la vida en la tierra, y es la base física, química y biológica de los ecosistemas que viven en la tierra. Dentro del ámbito de la producción agropecuaria cumple como función esencial servir de medio de anclaje y nutrición para las plantas, así como de regulador de los procesos biogeoquímicos que mantiene la fertilidad y permiten la generación continua de los alimentos (Bhaduri et al., 2022).

La salud del suelo representa la capacidad sostenida de este recurso para funcionar como un sistema vivo dentro de su ecosistema, sustentando la productividad biológica, preservando

la calidad ambiental y contribuyendo al bienestar de plantas, animales y seres humanos, cuyo concepto integra las tres dimensiones esenciales: la productiva, la ambiental y la biológica (Maharjan et al., 2024).

7.1.2. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo

El suelo constituye un recurso natural de carácter no renovable, cuya productividad y calidad dependen del comportamiento conjunto de sus características físicas, químicas y biológicas. Dichos atribuidos representan los parámetros esenciales para evaluar el estado del suelo y su capacidad de sustentar actividades agropecuarias de manera eficiente (ITPS,2020).

7.1.2.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas del suelo son: Textura, Estructura, Porosidad, Densidad aparente, Permeabilidad. Cuando estas propiedades se encuentran afectadas por erosión o compactación debido al uso intensivo de maquinaria y pastoreo , se reduce la porosidad y el desarrollo radicular, comprometiendo la capacidad productiva del suelo (Rodríguez et al., 2025).

7.1.2.2. Propiedades químicas

Las propiedades químicas del suelo son: pH Capacidad de intercambio catiónico, Disponibilidad de nutriente, Materia orgánica, Conductividad electrica, Niveles de salinidad. Estos atributos determinan su fertilidad, siendo el pH un indicador clave al controlar la solubilidad de nutrientes como la actividad microbiana además que el uso excesivo de fertilizantes, plaguicidas y herbicidas alteran estas propiedades generando desequilibrio biogeoquímico que deterioran la fertilidad del suelo a largo plazo (Quijano et al., 2021).

7.1.2.3. Propiedades biológicas

Las propiedades biológicas del suelo son: Macro y microfauna edáfica, Actividad microbiana, Descomposición de materia orgánica, Diversidad de microrganismos, Ciclaje de

nutrientes. Las propiedades que tiene el suelo se encuentran presentes porque allí vive un número diverso de organismos. La actividad de los organismos que viven en el suelo se encuentra íntimamente ligada a la actividad microbiana. La actividad de los microorganismos es un mejor indicador de lo que pasa en el suelo ya que participa en el proceso de descomposición de la materia orgánica y del ciclado de nutrientes. (ITPS,2020).

7.1.3. Indicadores de calidad del suelo

El uso de estos indicadores de calidad del suelo resulta fundamentalmente para evaluar su estado actual, anticipar tendencias de cambio y orientar estrategias de manejo sostenible que mejoren la gestión del recurso edáfico en los sistemas de producción agrícola (Castillo et al., 2021).

La medición de la calidad del suelo requiere contar con esquemas de interpretación claros. De acuerdo a Bünemann et al. (2018), se han utilizado propiedades como el porcentaje de materia orgánica, fósforo Olsen y potasio y magnesio intercambiables para crear índices adecuados. Asimismo, para mejorar la calidad de los suelos, se han incorporado las apreciaciones cualitativas de los productores, como el color, olor y facilidad de trabajo. A partir de esta información se pueden diseñar estrategias locales que se alineen a la conservación del recurso edáfico.

7.1.4. Degradación del suelo en zonas de producción lechera

La deterioración de los suelos en los sistemas de producción bovina de leche responde a una combinación de factores que comprenden la disminución del contenido de materia orgánica, el endurecimiento del perfil edáfico, los procesos erosivos, la acidificación progresiva y el declive de la fauna y flora microbiana. En el contexto ecuatoriano, las actividades ganaderas abarcan el 82% de la superficie destinada al uso agropecuario; no obstante, las prácticas deficientes en el manejo del pastoreo, especialmente en zonas con alta densidad animal, han

suscitado una creciente preocupación respecto al endurecimiento del suelo y sus consecuencias sobre la capacidad de almacenamiento hídrico (Garcia et al., 2022).

En la sierra ecuatoriana, los suelos ganaderos de origen volcánico con predominio de andosoles se caracterizan por su alta porosidad y rico contenido orgánico, propiedades que se ven comprometidas por el uso intensivo. (Leisa 2024) señala que cuando estos suelos se secan hasta alcanzar el punto de marchitez, sus partículas adquieren propiedades hidrofóbicas y sufren una deshidratación irreversible, convirtiéndose en uno de los principales problemas de degradación edáfica en los Andes ecuatorianos.

7.1.5. Erosión del suelo en sistemas ganaderos

La erosión del suelo representa una de las principales amenazas para la sostenibilidad de los sistemas de producción lechera, especialmente en zonas de alta pendiente como las de la Sierra ecuatoriana. El principal impacto ambiental negativo de la producción ganadera es el pastoreo o consumo excesivo del forraje, lo que lleva a la degradación de la vegetación, mayor erosión del suelo y deterioro de su fertilidad y estructura (Publiagro, 2026)

El sobrepastoreo es el detonante principal de este proceso. Una densidad animal excesiva lleva al sobrepastoreo, donde los animales consumen más pasto del que puede regenerarse naturalmente, generando pérdida de cobertura vegetal, compactación del suelo, erosión y pérdida de nutrientes esenciales (CONtexto Ganadero, 2025). En Ecuador esta problemática tiene una dimensión estructural, dado que la ganadería ocupa el 82% de la tierra destinada al sector agropecuario, y en zonas de pastoreo intensivo la infiltración del agua puede reducirse hasta en un 30%, afectando la disponibilidad hídrica y limitando la regeneración de la vegetación nativa (Taipe et al., 2022).

7.2. Cromatografía de Pfeiffer

*7.2.1. **Fundamento teórico del método** Ehrenfried Pfeiffer*

Entre las metodologías de evaluación edáfica de carácter cualitativo se destaca la Cromatografía Circular de Pfeiffer (CCP), cuyo origen se atribuye al investigador de nacionalidad suiza y estadounidense Ehrenfried Pfeiffer (1899-1961). Este científico tomó como base los fundamentos de la cromatografía en papel y los reorientó hacia el estudio del suelo, con el propósito de obtener una valoración conjunta de sus atributos biológicos, químicos y físicos. La visión que impulsó este desarrollo partía de entender el suelo no como un sustrato inerte, sino como un sistema biológicamente activo en el que los microorganismos desempeñan un papel protagónico al transformar de manera permanente moléculas orgánicas e inorgánicas de diversa complejidad (Hernández et al., 2025).

Etimológicamente, el vocablo cromatografía deriva de los términos griegos chromatos, cuyo significado es 'color', y graphein, que equivale a 'escribir', aludiendo al fenómeno por el cual los distintos componentes de una sustancia se separan y desplazan a través de un medio, produciendo imágenes y patrones de color diferenciados susceptibles de ser analizados de forma visual y cualitativa (Bachhav et al., 2024).

En cuanto a su aplicación en el estudio del suelo, fue Pfeiffer quien, durante la década de 1950, tomó la cromatografía circular en papel, originalmente empleada en el análisis químico convencional, y la reorientó hacia la evaluación específica de suelos, abonos y productos de origen agrícola, logrando así que esta metodología estuviera al alcance de agricultores y profesionales técnicos que trabajan directamente en campo (Domingues et al., 2022).

Dentro del conjunto de herramientas empleadas en la agroecología para diagnosticar el estado del suelo, la CCP ha ganado terreno progresivamente en distintas regiones del mundo, incluyendo Europa, América del Norte y América del Sur, siendo su uso más frecuente en

sistemas de producción biodinámica y en experiencias de manejo agroecológico (Cruz et al., 2023).

7.2.2. Principio Químico: Reacción con Hidróxido de Sodio e Impregnación con Nitrato de Plata

El proceso analítico de la Cromatografía Circular de Pfeiffer parte de la extracción de los componentes edáficos a través de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 1%, de naturaleza alcalina, cuya función es disolver y movilizar las fracciones del suelo. El resultado se eleva por capilaridad en un papel filtro de forma circular que ha sido tratado con nitrato de plata ($AgNO_3$), una sustancia foto sensitiva que, a los componentes del extracto que llevan al nitrato de plata ($AgNO_3$) no se rompe a diferencia de la mayoría de los otros compuestos, ocurre una reacción foto sensitiva originando coloraciones y texturas diferenciadas. Estas coloraciones permiten reconocer y diferenciar al mismo tiempo y de forma integrada las fracciones orgánicas, minerales y biológicas del suelo (Domingues et al., 2022).

Cuando el extracto del suelo entra en contacto con el nitrato de plata del papel filtro, se produce la reducción del ion plata (Ag^+) debido al aporte de compuestos orgánicos de la solución. Como resultado, se originan tonalidades y coloraciones particulares cuya intensidad y distribución varían en función de la concentración y el tipo de materia orgánica, la composición mineral y el nivel de actividad biológica que presenta el suelo analizado (Mendoza, 2024).

7.2.3. Interpretación de los cromatogramas

La lectura e interpretación de los cromatograma generados mediante la técnica de Pfeiffer se lleva a cabo a partir del examen visual de las bandas concéntricas que emergen sobre el papel filtro como consecuencia del desplazamiento capilar del extracto de suelo (Cruz et al., 2023). Los distintos trazos que se aprecian en el cromatograma son debidos a la interrelación que se establece entre los reactivos que han sido utilizados y los componentes del suelo. Esto

garantiza ofrece una valoración global del estado físico, químico y biológico del suelo en un solo cromatograma. Las investigaciones realizadas en años recientes han dado pasos hacia la correlación estadística entre los patrones visuales del cromatograma y parámetros cuantitativos de calidad del suelo, los cuales se han determinado mediante métodos analíticos convencionales. Esto ha ayudado a fortalecer el respaldo científico de la metodología.(Mendoza, 2024).

7.2.4. Zonas de lectura diferenciadas en el cromatograma de Pfeiffer

7.2.4.1. La zona central:

Expresa las características físicas del suelo; cuando presenta una tonalidad blanco-cremosa con proyecciones hacia las zonas adyacentes, se interpreta como señal de un suelo con una buena aireación, estructura adecuada y niveles satisfactorios de materia orgánica (Hernández et al., 2025).

7.2.4.2. La zona interior:

Por su parte, da cuenta de las condiciones químicas del suelo; la presencia de una coloración oscura que se extiende de manera continua hacia las demás zonas sin presentar interrupciones es considerada un rasgo positivo, indicativo de una actividad química equilibrada (Hernández et al., 2025).

7.2.4.3. La zona intermedia:

Esta refleja el contenido de materia orgánica disponible en el suelo; una coloración tenue con un borde plano, circular y sin prolongaciones complementarias es característica de suelos empobrecidos en materia orgánica o con algún grado de deterioro edáfico (Hernández et al., 2025).

7.2.4.4. La zona externa:

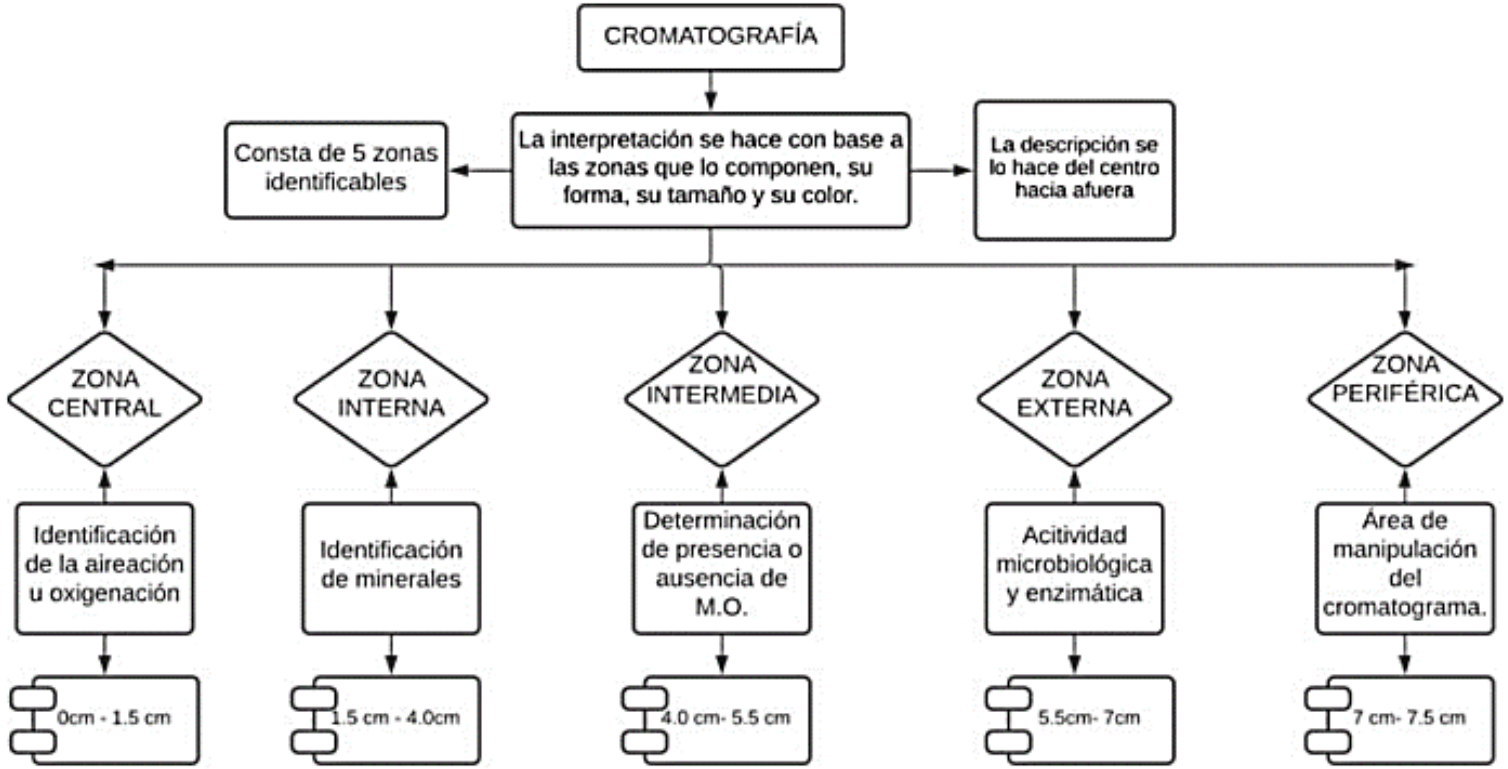
Conocida también como zona enzimática o coloidal, constituye un reflejo directo de la actividad biológica del suelo y de la presencia de sustancias húmicas de mayor complejidad molecular (Hernández et al., 2025).

7.2.4.5. La zona periférica:

Establece el límite exterior del cromatograma y su extensión total refleja el grado de organización e interacción entre los distintos componentes edáficos. (Hernández et al., 2025).

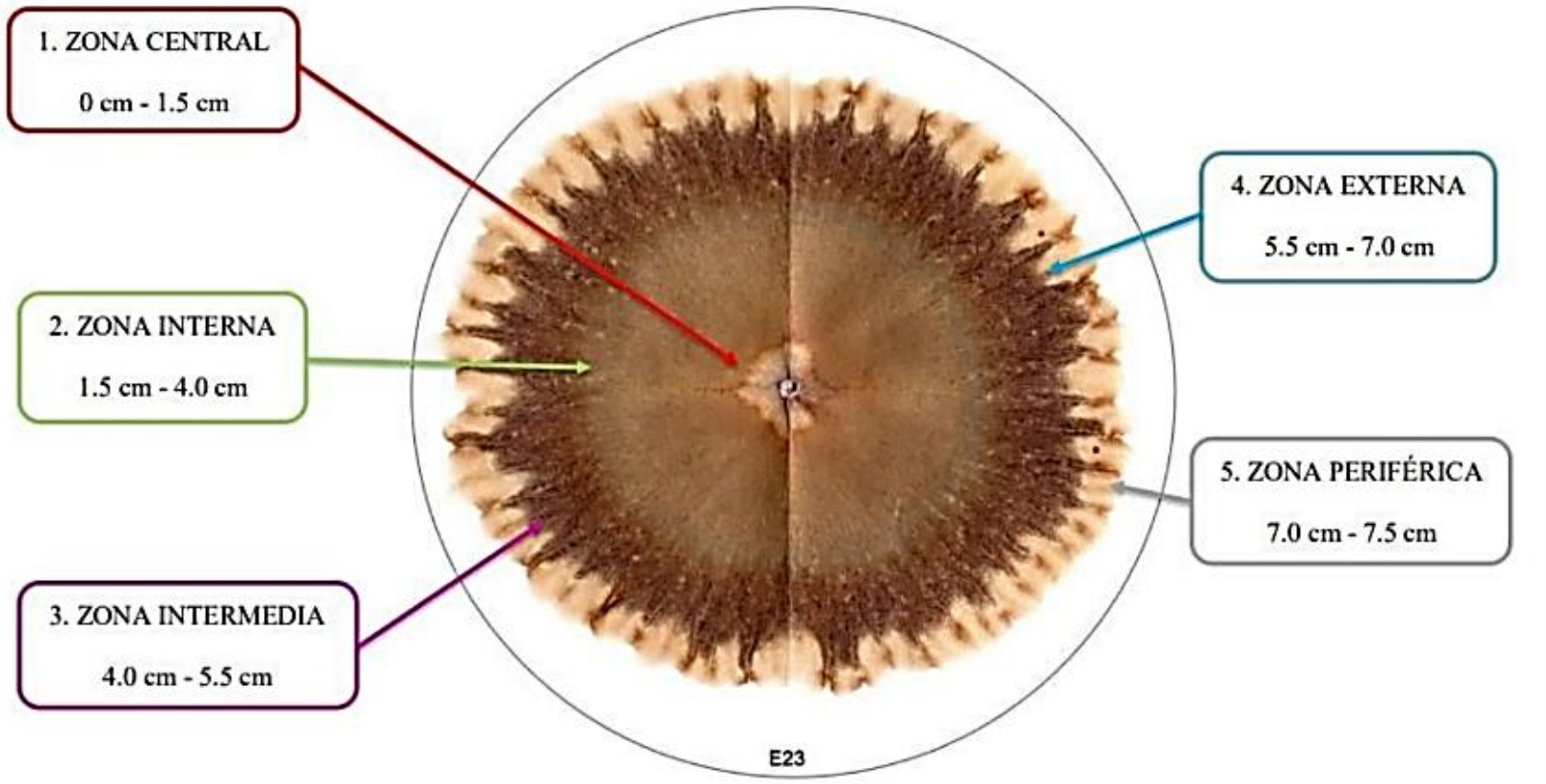
La valoración simultánea de los colores, formas, texturas y la coherencia entre todas las zonas del cromatograma proporciona al técnico o al productor los elementos necesarios para emitir un diagnóstico global sobre la salud del suelo (Ramos, 2022).

Figura 1. *Mapa de Identificación de las Zonas de un Cromatograma para su Interpretación*



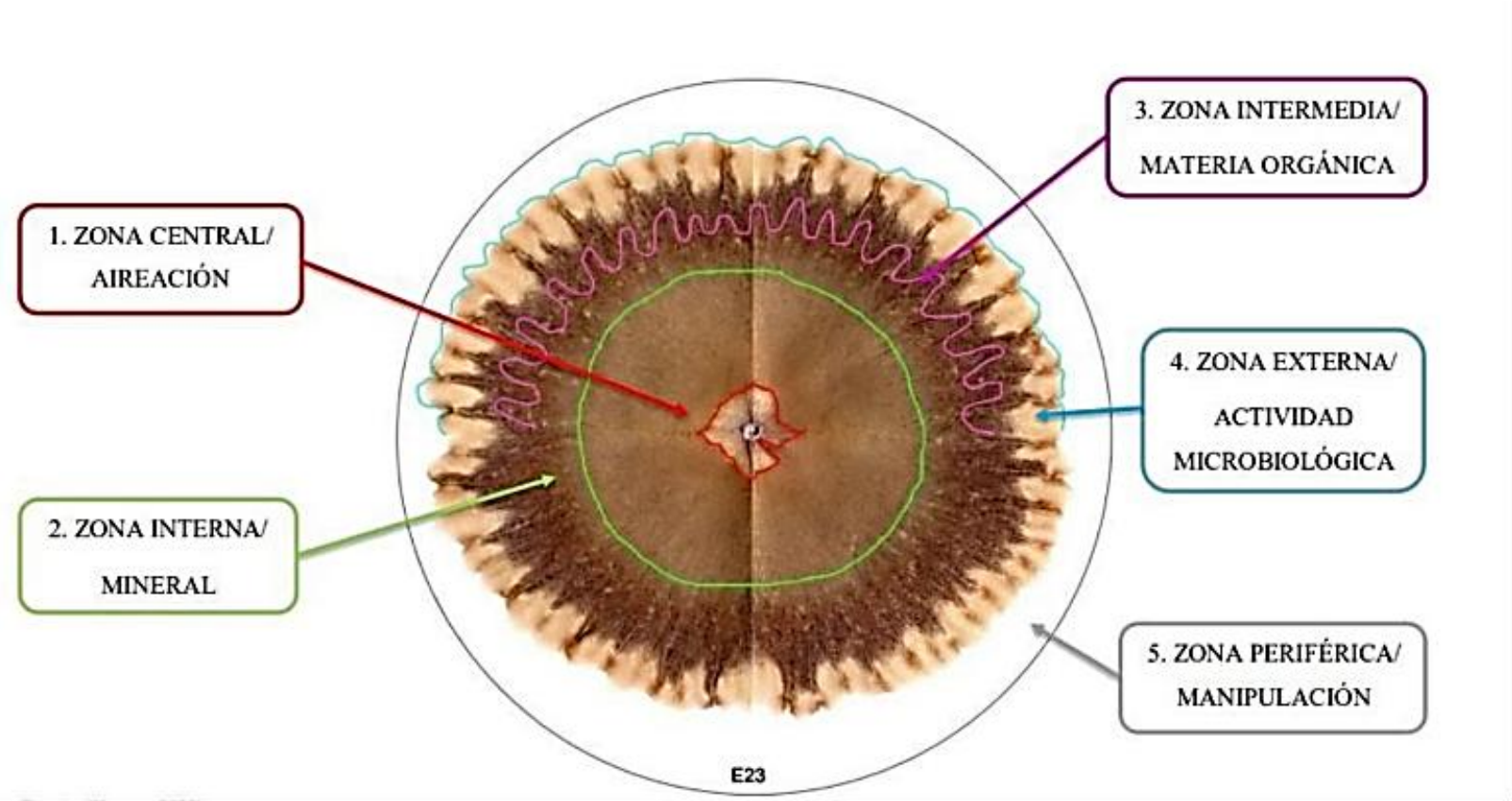
Autor: (Obando, 2021)

Figura 2. Identificación de las zonas con diámetro ideal de un cromatograma para su interpretación



Autor: (Herrera, 2022)

Figura 3. Identificación de las zonas con diámetro de un cromatograma para su interpretación



Autor: (Herrera, 2022)

Tabla 2. *Interpretación de la zona central o de estructura de suelo*

INTERPRTACIÓN DE LA ZONA CENTRAL O DE ESTRUCTURA DE SUELO			
Permite la interpretación de la estructura y manejo cultural que tiene el suelo			
NIVEL	**CROMATOGRAMA**	**COLOR**	**INTERPRETACIÓN**
Bajo		Negro, Gris, Cenizo	Estructura de suelos destruidos por mecanización y excesiva aplicación de fertilizantes químicos
Medio		Blanco	Uso de abonos orgánicos no descompuestos, con alto contenido de nitrógeno orgánico y adulterados con fertilizantes químicos a base de urea.
Alto		Crema	Buen manejo de maquinaria agrícola que proporciona buena estructura y manejo de agricultura orgánica.

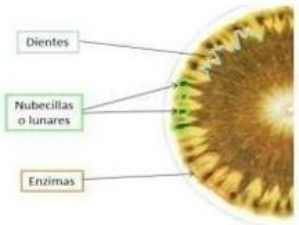
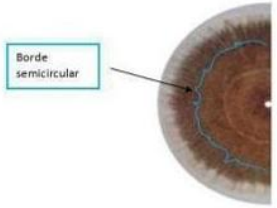
Autor: (Chanalata, 2023)

Tabla 3. Interpretación de la zona interna o zona mineral

INTERPRTACIÓN DE LA ZONA INTERNA O ZONA MINERAL			
Relación del desplazamiento y la reacción del nitrato de plata con los minerales, y es donde se encuentran las sustancias más pesadas			
NIVEL	**CROMATOGRAMA**	**COLOR**	**INTERPRETACIÓN**
Bajo		Negro, Gris	Suelo compacto, mineralizado, destruida la materia orgánica y ausencia de actividad biológica y enzimática.
Medio		Degradado de anaranjado	Minerales aislados sin relación con la poca materia orgánica, no hay presencia de actividad enzimática.
Alto		Cafes claros a oscuros	Suelos con presencia de minerales integrados con la materia orgánica, presencia de actividad enzimática y biológica.

Autor: (Chanalata, 2023)

Tabla 4. Interpretación de la zona intermedia o zona proteica

INTERPRTACIÓN DE LA ZONA INTERMEDIA O ZONA PROTEICA			
Destaca la presencia o la ausencia de la materia orgánica en el suelo analizado			
NIVEL	**CROMATOGRAMA**	**ELEMENTOS**	**INTERPRETACIÓN**
Bueno		Dientes, lunares, enzimas	Alta actividad biológica y perfecta transformación de la materia orgánica en humus estable, formación de nubecillas enzimáticas, suelo sano.
Malo		Borde circular	Ausencia de materia orgánica son suelos totalmente mineralizados destruidos por la mecanización, por falta de cobertura vegetal o por la aplicación de fertilizantes químicos solubles.

Autor: (Chanalata, 2023)

Tabla 5. Interpretación de la zona interna o zona mineral

INTERPRTACIÓN DE LA ZONA EXTERNA O ZONA ENZIMATICA O NUTRICIONAL			
Destaca la presencia o la ausencia de la materia orgánica en el suelo analizado			
NIVEL	**CROMATOGRAMA**	**ELEMENTOS**	**INTERPRETACIÓN**
Bajo		Sin color en forma circular	Suelo agotado, afectado por la intensidad de su producción, la mecanización profunda y el uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos, afectando la humificación de la materia orgánica.
Medio		Pequeñas e irregulares agujas que sobresalen	Ligeras radiaciones indicativo de la poca materia orgánica, suelo en proceso de erosión y perdida de microbiota
Alto		Bordes irregulares con nubecillas	Suelo sano, gran actividad microbiológica diversificada y constante en el suelo, buen desarrollo de la formación enzimática y buena descomposición de la materia orgánica.

Autor: (Chanalata, 2023)

Tabla 6. Manejo de suelos con diferentes sistemas de producción

INTERPRTACIÓN DE MANEJO DE SUELOS CON DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN			
Destaca la presencia o la ausencia de la materia orgánica en el suelo analizado			
NIVEL	**CROMATOGRAMA**	**SISTEMA**	**INTERPRETACIÓN**
Bajo		Convencional	Uso de fertilizantes nitrogenados, suelo compactado, mineralizado, sin materia orgánica y ausencia de actividad biológica.
Medio		Temporal	Uso de fertilizantes y estiércol, los minerales están aislados de la poca materia orgánica, actividad enzimática y biológica escasa como consecuencia de un suelo desnudo y erosionado.
Alto		Orgánico	Suelo orgánico, indica la integración de todas las zonas abundante actividad enzimática, con buena presencia de materia orgánica y minerales integrados por l actividad microbiológica.

Autor: (Chanalata, 2023)

7.2.5. Ventajas del uso de la cromatografía circular de Pfeiffer

Una de las principales ventajas de la Cromatografía Circular de Pfeiffer frente a los métodos convencionales de análisis de suelos radica en su accesibilidad económica y operativa (Mendoza, 2024). Se trata de una técnica que requiere muy poca materia prima, reactivos de bajo costo y equipamiento mínimo, lo que la convierte en una alternativa viable para productores familiares, técnicos de campo y comunidades rurales que no tienen acceso fácil a laboratorios especializados (Cruz et al., 2023).

A diferencia de los análisis convencionales de suelos, los cuales abordan la dimensión biológica, química y física de forma independiente y con una mayor demanda de tiempo y recursos, la CCP presenta una imagen unificada del estado edáfico, evaluando a la vez las tres dimensiones en un solo procedimiento. Cruz et al. (2023) señalaron que esta técnica es un indicador cualitativo de bajo costo y fácil acceso, que tiene un alto potencial en comparación con las técnicas cuantitativas. Es una alternativa que resulta eficaz para el seguimiento y valoración cualitativa del suelo, sobre todo en el caso de la agricultura familiar y la producción agroecológica.

7.3. Sistemas de Producción lechera

7.3.1. Tipología de Sistemas Ganaderos Intensivo, Semi-intensivo y Pastoreo

La clasificación de los sistemas de producción de leche depende del grado de tecnificación que aplican, de los tipos de uso del suelo, así como del tipo de alimentación que utilizan. Conocimiento de esta tipología. Resulta muy importante para el análisis de las variaciones en rendimiento productivo, impacto ambiental y prácticas de manejo de los diferentes esquemas ganaderos que coexisten en el territorio. Por lo común, la literatura especializada sería el sistema intensivo, el sistema semi-intensivo y el sistema de pastoreo extensivo, según Peña y otros, 2024.

El sistema intensivo tiene el ganado totalmente o parcialmente encerrado, se le suministran dietas de alto poder nutritivo, se aplica tecnología en lo sanitario y reproductivo, es decir, requiere un alto desembolso por unidad productiva (INIAP, 2022). El principal objetivo es alcanzar la máxima producción de leche por animal y por superficie. Pero, esto genera una alta dependencia de insumos externos y una creciente presión sobre los recursos naturales. En el contexto ecuatoriano, sólo el 4% de los productores han tecnificado sus unidades bajo este esquema, que son los que reportan los niveles más altos de productividad (Medina et al., 2024).

El sistema semi-intensivo combina la práctica del pastoreo directo con la suministración de alimento y un control más riguroso del ganado que el anterior. Las personas que utilizan este modelo agregan pasturas de mejor genética, hacen fertilización y riego, y tienen más control sobre el tiempo y la carga de pastoreo, sin llegar al confinamiento total del ganado. El esquema de producción más habitual de los pequeños y medianos ganaderos de la Sierra ecuatoriana, que complementan la dieta de los animales con leguminosas, residuos de cosecha y forrajes almacenados (Peña et al., 2024)

En la producción de ganado bovino el sistema de pastoreo extensivo es el que se desenvuelve en praderas naturales o semi-mejoradas con poca intervención tecnológica. Aunque disminuye los costes de operación, genera menor producción por animal y expone el suelo a un mayor deterioro por compactación y sobrepastoreo. En la Sierra ecuatoriana, este modelo es predominante en comunidades rurales con limitado acceso a financiamiento y apoyo técnico especializado (Mendoza, 2024).

7.3.2. Características de la ganadería en la sierra ecuatoriana

La principal actividad ganadera lechera del Ecuador se sitúa en la región Sierra. En todo el transcurso del año 2024 la Sierra contabilizó 519.191 vacas ordeñadas que entregaron 4.123.969 litros de leche. Esto representa más de tres cuartas partes de la producción lechera

nacional. La producción media por vaca en esta región de 7,9 litros diarios, resultó así la más alta entre las tres zonas productivas del país. Esta producción se explica por el uso de pastos cultivados y naturales que brindan condiciones nutricionales propicias para el ganado lechero.(Mendoza, 2024).

En la Sierra ecuatoriana, la actividad lechera está sostenida en su mayoría por unidades de producción de carácter familiar y pequeña escala. De acuerdo con los datos disponibles, cuatro de cada cinco productores de leche en el país corresponden a explotaciones pequeñas y familiares, mientras que únicamente el 20% restante pertenece a establecimientos de mediana o gran envergadura (Ionita, 2022). Esta configuración productiva incide directamente en el tipo de prácticas de manejo que se implementan, el nivel de acceso a herramientas tecnológicas y la capacidad económica disponible para invertir en el mejoramiento de las pasturas y la conservación del suelo.

7.3.3. Producción lechera en el cantón de Pujilí y la provincia de Cotopaxi

La provincia de Cotopaxi ocupa un lugar relevante dentro del panorama lechero nacional, siendo considerada una de las principales provincias productoras del país. Cotopaxi registra aproximadamente 23.180 cabezas de ganado y forma parte del grupo de provincias que concentran más del 60% de la producción lechera nacional, junto a Pichincha, Santo Domingo, Manabí y Carchi (CIL, 2024). La ganadería representa en esta provincia una actividad económica de gran importancia social, especialmente para las familias rurales de los cantones de Latacunga, Salcedo, Saquisilí y Pujilí, donde se concentran alrededor de 360 pequeños ganaderos (Ecuavisa, 2024).

Pujilí es un cantón de la provincia de Cotopaxi que según el censo 2022 se ha estimado tiene una población de 66.980 habitantes, cuya economía depende en gran parte de la producción de leche. Los productores de este cantón más bien se manejan bajo sistemas semi-intensivos y de pastoreo, ya que sus unidades de producción son familiares. La gran

dependencia de la producción que tiene en relación a los pastos, así como la alta vulnerabilidad a las inclemencias del clima de la zona. Los periodistas que evalúan sus anualidades posiblemente ya hayan hecho uso del crédito con tope que asegura de un subsidio los tipos de cambio. Y el Gobierno jura por "su confianza" en que en la altura del InFOVEC junior puedan abonar un "milagro".(Mendoza, 2024).

7.3.4. Costos de producción lechera

La estructura de costos en los sistemas de producción lechera es compleja y varía según la escala y tecnificación de cada unidad productiva. En Ecuador, la alimentación animal representa el 40% de los gastos totales, seguida por la mano de obra con un 35%, mientras que insumos e impuestos abarcan entre el 22% y el 3% restante (Cochancela & Alvarado, 2025).

Esta realidad es especialmente crítica para los pequeños productores, quienes constituyen la mayoría del sector. De los aproximadamente 299.000 productores de leche ecuatorianos, el 80% son granjas pequeñas y familiares, y apenas el 4% está tecnificado con alta productividad (MAG, 2022). En este contexto, como producto de factores externos como la pandemia y conflictos internacionales, los precios de los insumos registraron aumentos de hasta el 300%, mientras que el precio de la leche se mantuvo estancado, sumiendo a muchos productores en una economía de sobrevivencia (Ortiz , 2024).

A nivel local, estudios en la Sierra ecuatoriana evidencian la misma tendencia. Investigaciones en productores de la región andina señalan que los costos indirectos representan el 71,97% del total de costos, donde el grupo de mayor producción registró un costo promedio de 0,31 USD por litro, frente a 0,25 USD en el grupo de menor producción (Cochancela & Alvarado, 2025) Ante esto, la gestión eficiente de los insumos alimenticios tiene el mayor potencial para reducir costos, siendo la alimentación el factor que más influye en la variabilidad de los costos entre fincas (Ionita,2022).

7.4. Relación Suelo–Planta–Animal

7.4.1. Nutrición Mineral del suelo y calidad del forraje

El contenido mineral presente en el suelo ejerce una influencia determinante sobre el valor nutritivo de las pasturas que consume el ganado lechero. De acuerdo con (Contreras et al., 2023), la calidad del suelo se entiende como su aptitud para mantener la productividad biológica, resguardar las funciones ambientales y favorecer el desarrollo tanto vegetal como animal. Cuando el suelo experimenta desequilibrios en la disponibilidad de elementos esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio o zinc, estas carencias se reflejan inevitablemente en la composición del forraje producido, deteriorando su aporte nutricional y reduciendo el rendimiento lácteo (Biomemakers, 2024).

Los desequilibrios y deficiencias minerales en el suelo y en los forrajes han sido identificados como factores que inciden directamente en la baja productividad y en los problemas reproductivos del ganado de leche. En el caso particular de las vacas en lactancia, los minerales con mayor relevancia nutricional son el calcio, el fósforo, el magnesio y el azufre, elementos cuya disponibilidad está estrechamente condicionada por el pH y por las propiedades físicas y biológicas del suelo (Portilla, 2021) . Un suelo que ha sufrido compactación, erosión, empobrecimiento en nutrientes o disminución de su actividad biológica repercutirá negativamente sobre la productividad de las pasturas y, por extensión, sobre la rentabilidad del sistema lechero (Ayala , 2024).

7.4.2. Impacto de la Compactación y Materia Orgánica en la Producción lechera

La compactación del suelo ocasionada por el pisoteo del ganado en los sistemas de pastoreo moderado e intensivo ocasiona un aumento en la densidad aparente y una disminución en la infiltración de agua. También ocasiona el desgaste del carbono orgánico y del nitrógeno total del suelo, que afecta directamente la disponibilidad de forrajes por hectárea (FAO, 2025). La pérdida de materia orgánica, por su parte, deteriora la estructura edáfica, reduce la actividad

biológica y limita la capacidad del suelo para ofertar servicios ecosistemas, generando un ciclo progresivo de degradación que impacta negativamente en la producción láctea (Contreras et al., 2023). Frente a esta problemática, el manejo rotacional de potreros, el control de la carga animal y el respeto de los períodos de recuperación de las pasturas se reconocen como las prácticas más efectivas para preservar la salud edáfica y garantizar la sostenibilidad de los sistemas lecheros (Ayala , 2024).

8. VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS

Hipótesis nula (H_0):

No existe relación entre la salud edáfica del suelo evaluada con cromatografía de Pfeiffer y la sostenibilidad de los sistemas de producción lechera familiar en el cantón Pujilí.

Hipótesis alternativa (H_1):

Existe una relación entre la salud edáfica del suelo evaluada con cromatografía de Pfeiffer y la sostenibilidad de los sistemas de producción lechera familiar en el cantón Pujilí.

9. METODOLOGÍA Y ANALISIS ESTADISTICO

9.1. Metodología

9.1.1. Área de estudio

El cantón Pujilí se encuentra ubicado en la provincia de Cotopaxi, en la región interandina del Ecuador, con coordenadas 0°57′0″S y 78°41′24″O. Cuenta con una extensión territorial de 1.289 km² y una población de 66.980 habitantes según el censo nacional de 2022 (INEC, 2022).



GADM. (2018). Gadm.Org. https://gadm.org/maps/ECU/cotopaxi/pujili.html

En este estudio se evaluaron 14 productores con un total de 42 potreros distribuidos en sus predios. Esta base muestral permitió caracterizar tanto la condición edáfica de las áreas de pastoreo como los indicadores productivos y económicos de cada unidad de producción.

9.1.2. Unidades de producción consideradas en el área de estudio

Tabla 7. Unidades de producción del área de estudio

Sector	Superficie	Propietario
Cochaloma	25,000 m2	Blanca Criollos
	40,000 m2	Leonor Allauca
	600 m2	Patricia Curicho
La Merced	15,000 m2	Maria Simaluisa
	10,000 m2	Maritza Guaman
	20,000 m2	Paulina Rojas
	15,000 m2	Rosa Simaluisa
20 de Diciembre	750 m2	Graciela Suntaxi
	15,000 m2	Gladys Caguano
	10,000 m2	Lorena Cailagua
	25,000 m2	Luisa Tanguila
	15,000 m2	Luz Suntaxi
	15,000 m2	Narcisa Tanguila
	10,000 m2	Consuelo Suntaxi

Elaborado por: (Mariscal, 2026)

9.1.3. Método de muestreo de suelo

9.1.3.1. Materiales

- ✓ Fundas herméticas
- ✓ Cinta masking
- ✓ Excavadora

- ✓ Marcador
- ✓ Pala
- ✓ Balde

9.1.3.2. Procedimiento

Para realizar el muestreo de suelo para la elaboración de cromatografías se analizó la bibliografía propuesta por (Schweizer, 2011).

1. Se identificó el área de los productores vinculados al proyecto DIRGI_CP2021-003, donde consideramos 14 productores.
2. Del área seleccionada retiramos los restos vegetales sin interferir en el proceso.
3. Con la ayuda de una excavadora, un balde y una pala se tomaron las muestras, recortando los extremos para que la muestra sea más significativa.
4. El muestreo fue completamente al azar, con una profundidad de 20 cm y se logró obtener una muestra compuesta de 15 submuestras de acuerdo al tipo de forraje dentro de cada área.
5. después de tener las 15 submuestras se procedió a mezclarlas en un recipiente grande para así obtener la muestra compuesta de 1 kg.
6. Seguidamente de esto se guarda toda la muestra en una funda hermética, se etiqueta de acuerdo al lugar y al productor que pertenece.
7. Se lleva al secado y seguidamente de esto al laboratorio para realizar la cromatografía de Pfeiffer.

9.1.4. Metodología de la cromatografía de Pfeiffer

9.1.4.1. Materiales

Laboratorio

- ✓ Muestras
- ✓ Tamiz
- ✓ Hojas de papel bond
- ✓ Balanza gramera
- ✓ Caja de cartón
- ✓ Papel filtro

- ✓ Hidróxido de sodio (NAOH)
- ✓ Nitrato de Plata (AgNO3)
- ✓ Mortero
- ✓ Agua destilada
- ✓ Papel toalla
- ✓ Cajas Petri
- ✓ Compas
- ✓ Marcador
- ✓ Regla
- ✓ Papel aluminio
- ✓ Jeringuillas
- ✓ Probetas
- ✓ Vasos de precipitación
- ✓ Cinta masking

9.1.4.2. Protocolo de elaboración de la cromatografía

El protocolo utilizado para la obtención de los cromatogramas de suelo corresponde al propuesto por Rivera & Pinheiro (2011), donde se menciona que para el análisis cromatográfico existen diferentes actividades:

1. Una vez obtenidas las muestras de suelo se clasifican estás de acuerdo a los códigos del asignado del productor.

2. Las muestras se secan sobre hojas de papel boom por 3 días.

3. Cuando las muestras están secas se toman submuestras de 100 g, las cuales se tamiza sobre papel boom, esto para obtener una muestra sin impurezas.

4. A continuación, las submuestras son molidas en un mortero hasta conseguir que la muestra sea como un polvo fino semejante al talco.

5. Con balanza minigramera se pesan 5 g de la muestra bien filtrada y se identifican con su respectivo código la muestra restante se guarda como contra muestra de seguridad.

6. Preparación de la solución. Para la disolución en agua destilada del suelo, se prepara una solución al 1% de Naoh. Se dispondrá de 50 ml de la solución para cada muestra de 5 gramos.

7. Se crea una disolución al 0.5% de nitrato de plata (AgNO3). Algo más de medio gramo de nitrato de plata se va a disolver en 100 ml de agua destilada.

8. Para hacer un papel filtro, se recorta un círculo de 15 cm, luego se perfora el centro de este papel con un palillo de dientes.

9. Un pabilo está conformado por un círculo que tiene un punto en el centro, que después de un diagnóstico de la materia se concluye que es el más adecuado. Para eso se utilizan papel filtro, de 2 cm x 2 cm tanto de alto como de diámetro. Con la ayuda de un palillo de dientes se forma el pabilo que va en el centro del círculo.

10. Una vez marcado el centro se mide 4 y 6 cm para saber hasta dónde va a correr la solución de (AgNO3) y seguidamente el (NAOH) con la disolución del suelo.

11. Una vez marcado el papel se hace el corrido del (AgNO3) ubicando la caja Petri pequeña dentro de la grande, agregamos la solución de nitrato de plata y colocamos el papel filtro con su respectivo pabilo, una vez impregnada la solución hasta los 4 cm retiramos con cuidado el pabilo y guardamos en una caja de cartón colocando papel bon y cubriéndolo de ambas caras con papel secante, cerramos muy bien y esperamos que seque aproximadamente entre 4 horas.

12. Cuando el papel ya esté listo se mezclarán los 5 gr de suelo con los 50ml preparados de la solución de hidróxido de sodio, seguidamente se harán series de 7 giros a la derecha y 7

giros a la izquierda hasta completar 49 giros. La muestra permanece en reposo por un período de 15 minutos antes de volver a agitarla. Después de dejar la muestra en reposo por una hora, se vuelve a realizar el giro. Finalmente, se deja reposar durante 6 horas para finalizar el tiempo de reacción del (NAOH).

13. Una vez reposada completamente la solución de (NAOH), y seco el papel filtro colocar la caja Petri pequeña dentro de la grande, con ayuda de una jeringa se toma 20 ml de la solución y se coloca en la caja pequeña. Después se coloca el papel hartón y se lleva a cabo el "corrido final de la muestra", el cual tiene una longitud aproximada de 6 cm.

14. Secado de la cromatografía final. Se retira el pabilo y se cubre de ambas caras con papel secante. Una vez se le ha hecho la identificación se coloca en una caja de cartón hasta que quede bien seco, luego de este tiempo se pone a una ventana para su respectivo revelado.

15. After drying, chromatograms must be identified with the corresponding code of each sample, this must be marked with a pencil in the area at the end of the sample.

16. Finalmente se guardan los resultados de la cromatografía con separadores para que no pierdan el color, este protocolo de cromatografía proporciona la siguiente información.

- Estructura del suelo
- Presencia de minerales
- Presencia de Materia Orgánica

9.1.5. Metodología de la biomasa del forraje

9.1.5.1. Materiales

- ✓ Cuadrante de 0,50 m x 0,50 m (0,25 m^2)
- ✓ Oz
- ✓ Costales

- ✓ Cinta masking
- ✓ Marcador

9.1.5.2. Protocolo de medición de biomasa forrajera

La medición de la biomasa forrajera se realizó basado el método de corte directo con cuadrante, siguiendo el procedimiento descrito por (Méndez Vinueza, 2021) y (UPEC, 2023):

1. En cada potrero se identificaron tres zonas donde el pasto crecía de manera uniforme, evitando las orillas y los lugares donde había sombra o charcos de agua.
2. En cada una de estas zonas se lanzó el cuadrante de PVC de 0,50 m × 0,50 m dos veces, lo que dio un total de seis muestras de forraje verde por potrero.
3. Todo el pasto que quedó dentro del cuadrante se cortó a ras del suelo, se recogió y se pesó con una romana, anotando el peso fresco en kilogramos.
4. La totalidad de cada muestra recolectada se extendió se dejó secar al sol durante tres días consecutivos, hasta que el peso ya no presentaba variación, momento en el que se registró el peso seco final.
5. Con los pesos obtenidos se calculó el porcentaje de materia seca de cada muestra

utilizando la fórmula para calcular el porcentaje de Materia Seca:

Ecuación 1

$$MS(\%) = \frac{Peso\ seco\ (PS)g}{Peso\ fresco\ (PF)g} \times 100$$

(Cáceres & González , 2000)

9.1.5.3. Metodología de producción de leche

Para llevar el registro de la producción de leche por cada unidad productiva durante todo el tiempo que duró la evaluación se recogía los datos de la leche de cada vaca por separado usando un recipiente limpio durante el ordeño y se medía la cantidad de leche producida. Así

se iba recopilando los datos de cuánto produjo cada animal y cuántos litros en total salieron del predio.

9.2. Análisis Estadístico

9.2.1. Análisis estadístico por objetivo específico

Objetivo específico 1: Caracterización de la salud edáfica

La caracterización edáfica se basó en cuatro variables categóricas ordinales correspondientes a las zonas del perfil de suelo evaluadas mediante la escala croma de referencia: zona Central, Interna, Intermedia y Externa, cada una clasificada en los niveles Bajo, Medio y Alto según correspondiera. Debido a que estas variables no son numéricas, no fue posible aplicar una distancia euclidiana convencional; en su lugar se calculó la distancia de Gower, una medida de disimilitud ampliamente utilizada para variables categóricas y ordinales que permite comparar objetos evaluados con escalas cualitativas y ha demostrado buen desempeño en la agrupación de datos mixtos en ciencias de la salud y ambientales (Liu et al., 2024).

Sobre la matriz de distancias se aplicó un análisis de conglomerados jerárquico aglomerativo, empleando el método de Ward (ward.D2), el cual agrupa las unidades de manera que minimiza la varianza dentro de cada grupo en cada paso de fusión. Este enfoque ha sido aplicado con éxito en estudios de mapeo digital de suelos para identificar unidades relativamente homogéneas a partir de variables edáficas (Dunkl & Ließ, 2022). El procedimiento se ejecutó de dos formas complementarias:

Un análisis independiente para cada una de las cuatro zonas del perfil de suelo (Central, Interna, Intermedia y Externa), generando un dendrograma y una tabla de agrupación por cada zona. En cada caso, el número de grupos (k) para el corte del árbol (función cutree) se definió según la cantidad de niveles realmente presentes en los datos (verificado con la función table()), evitando forzar divisiones estadísticamente artificiales en variables sin variabilidad suficiente.

Un análisis general combinando las cuatro zonas simultáneamente, cortando el dendrograma en k = 4 grupos, lo que permitió obtener el conglomerado definitivo de caracterización del suelo para cada una de las 42 parcelas evaluadas.

Para cada conglomerado se determinó su perfil característico calculando la **moda** (nivel más frecuente) de cada zona dentro del grupo, y se calculó el número y porcentaje de parcelas correspondientes.

Adicional a esto se realizó una distribución de los 42 potreros conjuntamente de una curva de nivel

Objetivo Especifico 2: Relación entre salud edáfica y biomasa forrajera

La disponibilidad de biomasa forrajera se expresó como materia seca en kilogramos por hectárea (kg MS), calculada a partir del peso verde y el porcentaje de materia seca (%MS) de cada muestra. Cada parcela de suelo se vinculó con su valor correspondiente de MS mediante un código común de identificación.

Previo a la comparación de medias, se evaluó el supuesto de **normalidad** de la variable MS dentro de cada conglomerado mediante la **prueba de Shapiro-Wilk**, una prueba recomendada especialmente para tamaños de muestra reducidos y ampliamente utilizada en investigación agronómica de campo (de Souza et al., 2023). Como uno de los grupos (Conglomerado 2) no cumplió este supuesto ($p < 0,05$), se optó por la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar la disponibilidad de MS entre los cuatro conglomerados de suelo, en lugar de un ANOVA de un factor, siguiendo el criterio de que esta prueba es la alternativa apropiada cuando no se cumple la normalidad o cuando los grupos son pequeños y desbalanceados (Kroeger et al., 2021). La prueba de Kruskal-Wallis compara las medianas de los grupos a partir del ordenamiento (rangos) de los datos, sin asumir una distribución específica.

Como un análisis adicional dentro de este mismo objetivo se empleó un conglomerado jerárquico (método de Ward) considerando de forma conjunta tanto el peso fresco, la materia seca y el porcentaje de materia seca de las 42 muestras.

Objetivo específico 3: Relación de la salud edáfica con la producción de leche

Debido a que la producción de leche se registró a nivel de productor (litros/día) y no por parcela individual, los datos de suelo se agregaron previamente a ese mismo nivel, asignando como conglomerado representativo la **moda** (grupo predominante) entre las tres parcelas de cada productor. Se identificaron y reportaron los casos en los que las tres parcelas de un mismo productor no coincidieron en un único conglomerado, como una limitación metodológica inherente al reducido número de parcelas por unidad productiva.

Con la base de datos ya organizada a nivel de productor (n = 14), se aplicaron las siguientes pruebas:

Prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de la producción de leche (L/día).

Prueba de Mann-Whitney (Wilcoxon rank-sum) para comparar la producción de leche entre los conglomerados de suelo que contaron con al menos dos productores (Conglomerado 1, n = 8, y Conglomerado 2, n = 4), consistente con la recomendación de restringir las pruebas de hipótesis a grupos con tamaño muestral suficiente para estimar variabilidad (Kroeger et al., 2021). Los Conglomerados 3 y 4, representados por un único productor cada uno, se reportaron únicamente de manera descriptiva, ya que con n = 1 no es posible estimar variabilidad ni realizar inferencia estadística válida para ese grupo, en línea con estudios de tipificación de sistemas lecheros familiares que enfrentan limitaciones similares de representatividad muestral (Azeze et al., 2024).

En todas las pruebas se utilizó un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

10.1. Resultados generales

10.1.1. Interpretación cromatográfica por conglomerados

Tabla 8. Conglomerado 1 - Zona central

Nivel	Grupo	Parcelas
Alto	1	24
Bajo	2	18
Medio	3	0

La mayoría de ofertas (24 de 42) presentan un nivel alto color crema, que indica un buen control de la maquinaria agrícola, además del predominio de las prácticas orgánicas. No obstante, una agrupación importante (18 parcelas) se encuentra con nivel bajo y su estructura está destruida por la mecanización en exceso y el uso de fertilizantes químicos, lo que indica que una porción importante del suelo objeto de estudio se encuentra con deterioro estructural.. Ningún caso se ubicó en nivel medio.

Tabla 9. Conglomerado 2 - Zona interna

Nivel	Grupo	Parcelas
Alto	1	42
Medio	2	0
Bajo	3	0

El resultado más contundente es que el 100 % de las parcelas presentaron nivel alto en color café claro y oscuro. Esto es que en todas las muestras los minerales están bien integrados a la materia orgánica, hay actividad enzimática, biológica en todo el suelo analizado, así que son un muy buen signo de salud mineral del suelo.

Tabla 10. Conglomerado 3- Zona intermedia

Nivel	Grupo	Parcelas
Medio	1	29
Bueno	2	13

Predomina el nivel medio (29 parcelas) con bordes semicirculares. Esto indica que la materia orgánica se encuentra mineralizada y, en la mayoría de los casos, destruida por mecanización o falta de cobertura. Solamente 13 muestras presentan un nivel bueno, con dientes, lunar y enzimas visibles, alta actividad biológica y buena transformación en humus. Esto sugiere que la actividad proteica del suelo aún es deficiente en la mayoría de los casos.

Tabla 11. Conglomerado 4 - Zona externa

Nivel	Grupo	Parcelas
Medio	1	39
Bajo	2	3
Alto	3	0

Casi todas las parcelas (39 de 42) se ubican en nivel medio, con pequeñas agujas irregulares, lo que refleja poca materia orgánica y un suelo en proceso de erosión con pérdida de microbiota. Solo 3 parcelas cayeron en nivel bajo (suelo agotado) y ninguna alcanzó el nivel alto (suelo sano con gran actividad microbiológica), lo que indica que la actividad enzimática y nutricional del suelo está debilitada en general.

10.1.2. Resultados Biomasa Forrajera

Tabla 12. Resultados Biomasa Forrajera

Productor	Código Forrajes	Tipo de Forraje	P- kg (MV) m2	P- g (MV) m2	P - g (MS) m2	P - kg (MS) m2	% MS
Blanca Criollo	BC-F1	Avena	1,4	1400	258	0,258	18,43
Blanca Criollo	BC-F2	alfalfa	0,8	800	147	0,147	18,38

Blanca Criollo	BC-F3	Cebada	1,2	1200	221	0,221	18,42
Leonor Allauca	LA-F1	Alfalfa	1	1000	184	0,184	18,40
Leonor Allauca	LA-F2	Alfalfa	1,1	1100	215	0,215	19,55
Leonor Allauca	LA-F3	Alfalfa	1,9	1900	350	0,35	18,42
Patricia Curicho	PC-F1	Alfalfa	2,3	2300	424	0,424	18,43
Patricia Curicho	PC-F2	Alfalfa	0,8	800	151	0,151	18,88
Patricia Curicho	PC-F3	Rye grass - malva	0,8	800	145	0,145	18,13
Maria Simaluisa	MS-F1	Rye grass - trébol	0,7	700	129	0,129	18,43
Maria Simaluisa	MS-F2	Rye grass	1,1	1100	212	0,212	19,27
Maria Simaluisa	MS-F3	Rye grass - trébol	0,7	700	132	0,132	18,86
Maritza Guaman	MG-F1	Alfalfa - llantén	1	1000	184	0,184	18,40
Maritza Guaman	MG-F2	Alfalfa - llantén	0,6	600	111	0,111	18,50
Maritza Guaman	MG-F3	Rye grass	0,75	750	138	0,138	18,40
Paulina Rojas	PR-F1	Alfalfa	1,1	1100	214	0,214	19,45
Paulina Rojas	PR-F2	Alfalfa	0,8	800	156	0,156	19,50
Paulina Rojas	PR-F3	Rye grass - Alfalfa	1,2	1200	225	0,225	18,75
Rosa Simaluisa	RS-F1	Alfalfa	1,3	1300	240	0,24	18,46
Rosa Simaluisa	RS-F2	Alfalfa	1,2	1200	234	0,234	19,50

Rosa Simaluisa	RS-F3	Alfalfa	1,5	1500	276	0,276	18,40
Graciela Suntaxi	GS-F1	Alfalfa	1,3	1300	254	0,254	19,54
Graciela Suntaxi	GS-F2	Alfalfa	1,2	1200	227	0,227	18,92
Graciela Suntaxi	GS-F3	Alfalfa	1	1000	192	0,192	19,20
Gladys Caguano	GC-F1	Rye grass - Alfalfa	1,5	1500	281	0,281	18,73
Gladys Caguano	GC-F2	Alfalfa	1,2	1200	231	0,231	19,25
Gladys Caguano	GC-F3	Alfalfa	1,8	1800	332	0,332	18,44
Lorena Cailagua	LC-F1	Alfalfa	0,8	800	162	0,162	20,25
Lorena Cailagua	LC-F2	Alfalfa	1,5	1500	281	0,281	18,73
Lorena Cailagua	LC-F3	Alfalfa	1,1	1100	242	0,242	22,00
Luisa Tanguila	LT-F1	llantén - alfalfa	0,6	600	121	0,121	20,17
Luisa Tanguila	LT-F2	llantén - alfalfa	1,1	1100	223	0,223	20,27
Luisa Tanguila	LT-F3	Rye grass - Trébol	0,7	700	138	0,138	19,71
Luz Suntaxi	LS-F1	Alfalfa	0,8	800	175	0,175	21,88
Luz Suntaxi	LS-F2	Avena	0,9	900	215	0,215	23,89
Luz Suntaxi	LS-F3	Alfalfa	1,2	1200	239	0,239	19,92
Narcisa Tanguila	NT-F1	Alfalfa	1,4	1400	267	0,267	19,07
Narcisa Tanguila	NT-F2	Alfalfa	0,9	900	235	0,235	26,11

Narcisa Tanguila	NT-F3	Alfalfa	1	1000	188	0,188	18,80
Consuelo Suntaxi	CS-F1	Alfalfa	1,5	1500	291	0,291	19,40
Consuelo Suntaxi	CS-F2	Alfalfa	1,2	1200	245	0,245	20,42
Consuelo Suntaxi	CS-F3	Alfalfa	0,8	800	164	0,164	20,50

La biomasa forrajera registrada en los 42 potreros evaluados demostró una variabilidad importante entre productores en cuanto al peso fresco como en materia seca, mientras que el porcentaje de materia seca se mantuvo relativamente estable entre las distintas muestras esta variabilidad sugiere que la producción de la biomasa responde principalmente al manejo particular de cada potrero como la densidad de siembra, la época de corte o la fertilización más que a un patrón que comparten dentro del cantón.

10.1.3. Resultados producción de leche

Tabla 13. Producción de leche diaria por unidad productiva

Productor	**N de animales**	**N de animales en producción**	**L/día**	**L/mes**
Blanca Criollo	8	8	88	2640
Consuelo Suntaxi	10	3	24	720
Gladys Caguano	5	2	14	420
Graciela Suntaxi	8	6	48	1440
Leonor Allauca	3	3	28	840
Lorena Cailagua	9	9	80	2400
Luisa Tanguila	6	6	56	1680
Luz Suntaxi	6	6	67	2010
Maria Simaluisa	7	3	22	660
Maritza Guaman	5	5	38	1140
Narcisa Tanguila	7	6	45	1350

Patricia Curicho	7	7	52	1560
Paulina Rojas	3	2	12	360
Rosa Simaluisa	6	6	62	1860
Promedio			45,43	1362,86

La producción de leche registrada de los 14 productores presentó valores que van entre los 12 y 88 L/día con una producción promedio de 45,4 L/día por unidad productiva. lo que refleja una heterogeneidad dentro de la ganadería familiar del cantón que esta caracterizada por hatos pequeños de dos a cuatro vacas lo que es coherente con lo documentado por (Naranjo, 2024) que registra producciones promedio de 8,36 kg por unidad productiva en las parroquias de Pujilí. La dispersión observada entre productores sugiere que la productividad lechera está condicionada por múltiples factores propios de cada ya sean factores zootécnicos como la raza y los días en lactancia, más que por un factor único como la condición del suelo.

10.2. Resultados de análisis estadísticos

10.2.1. Resultados de análisis estadísticos por conglomerados

Se identificaron cuatro conglomerados de suelo, cuyo perfil característico y proporción de parcelas se resume en la Tabla 14

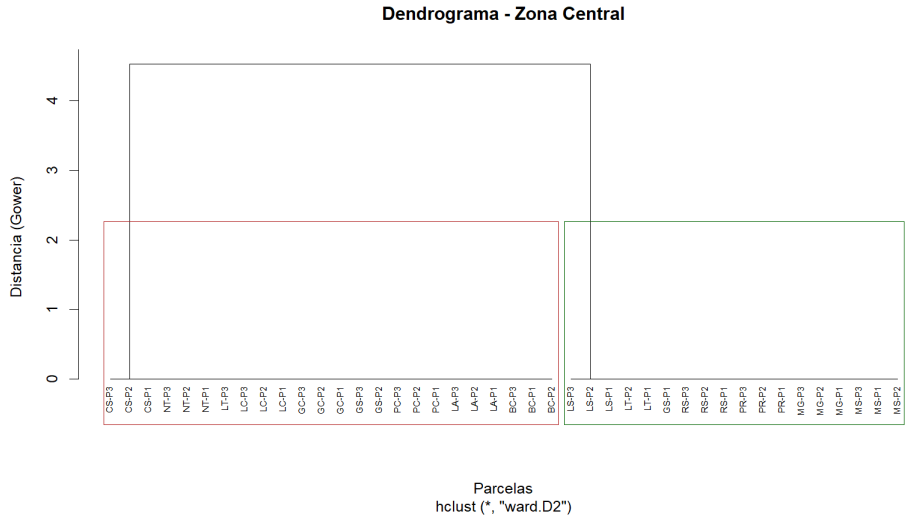
Tabla 14. Perfil y tamaño de los conglomerados generales de suelo (n = 42 parcelas)

Conglomerado	Perfil (Central / Interna / Intermedia / Externa)	N° parcelas	%
1 – Fertilidad Alta	Alto / Alto / Medio / Medio	23	54,8%
2 – Fertilidad Media-Alta	Bajo / Alto / Alto / Medio	13	31,0%

3 – Fertilidad Media	Bajo / Alto / Medio / Medio	3	7,1%
4 – Fertilidad Baja	Bajo / Alto / Medio / Bajo	3	7,1%

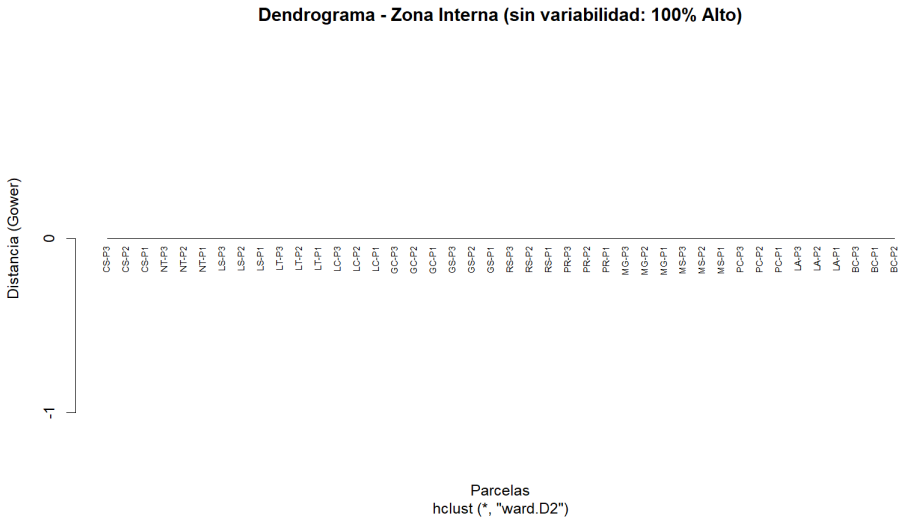
La zona Interna no mostró variabilidad entre parcelas (100% de los casos en nivel Alto), por lo que no constituyó un factor discriminante entre conglomerados; fue la zona Central la de mayor peso en la diferenciación de los grupos, seguida de la Intermedia. Los dendrogramas de cada zona y el dendrograma general se presentan en las Figuras 1 a 5.

Figura 4. *Dendrograma de la Zona Central.*



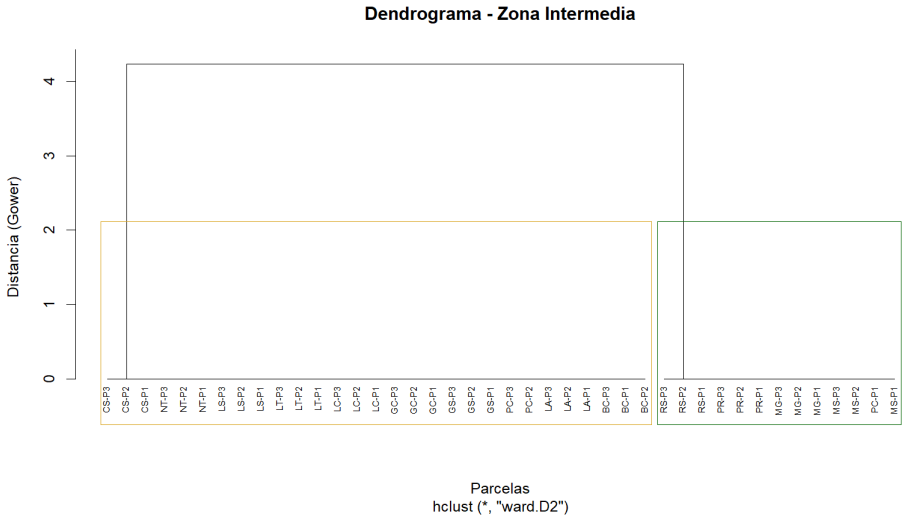
La zona Central se mide con tres niveles posibles: Bajo, Medio y Alto. Sin embargo, entre las 42 parcelas evaluadas solo aparecieron dos de esos niveles: 24 parcelas quedaron en Alto y 18 en Bajo, y ninguna parcela cayó en el nivel Medio. La distancia a la que se separan estos dos grupos en el gráfico es bastante grande, lo que quiere decir que son bastante diferentes entre sí. Por eso esta zona resultó ser la más útil para distinguir la fertilidad del suelo entre parcelas.

Figura 5. Dendrograma de la Zona Interna.



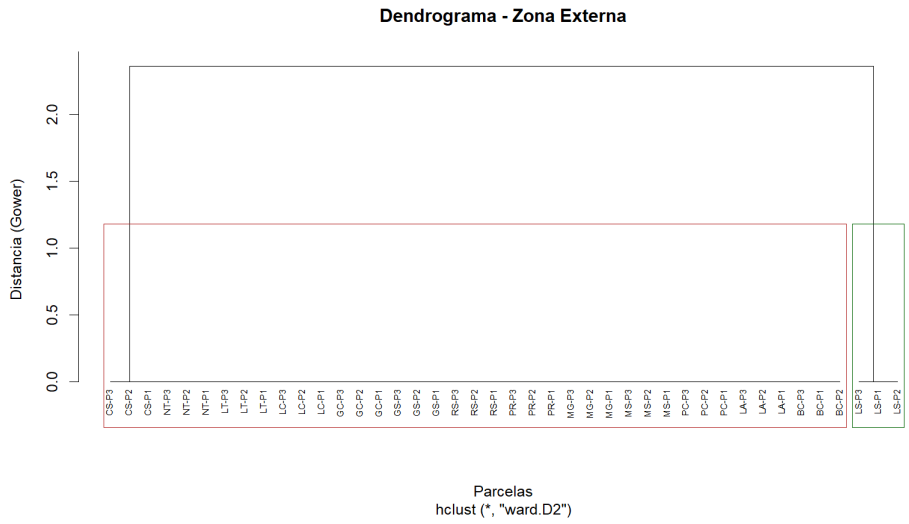
Al igual que las otras zonas, la zona Interna también podía clasificarse en tres niveles: Bajo, Medio y Alto. Pero en este caso, las 42 parcelas quedaron todas en el nivel Alto, sin que ninguna cayera en Bajo o en Medio. Como todas las parcelas son iguales en este aspecto, no hay ninguna diferencia que el gráfico pueda mostrar, por eso el dendrograma se ve como una línea plana sin divisiones. Esto significa que esta zona no ayuda a distinguir un tipo de suelo de otro.

Figura 6. Dendrograma de la Zona Intermedia



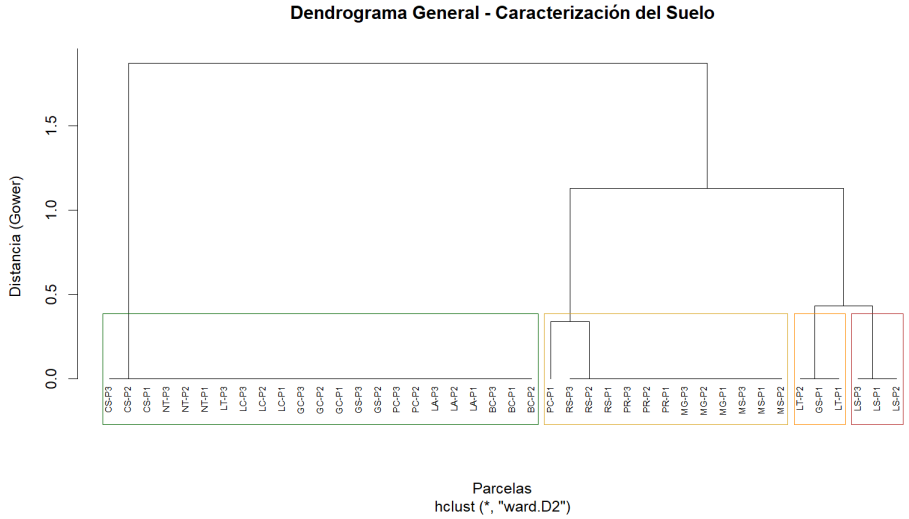
La zona Intermedia también se mide con tres niveles: Bajo, Medio y Alto. Aquí, ninguna parcela quedó en el nivel Bajo. El gráfico muestra que las 42 parcelas se dividieron en dos grupos: uno más grande de 29 parcelas en nivel Medio, y otro de 13 parcelas en nivel Alto. La distancia entre estos dos grupos es moderada, ni muy grande ni muy pequeña, lo que indica que esta zona ayuda a diferenciar el suelo, aunque no tanto como la zona Central.

Figura 7. Dendrograma de la Zona Externa.



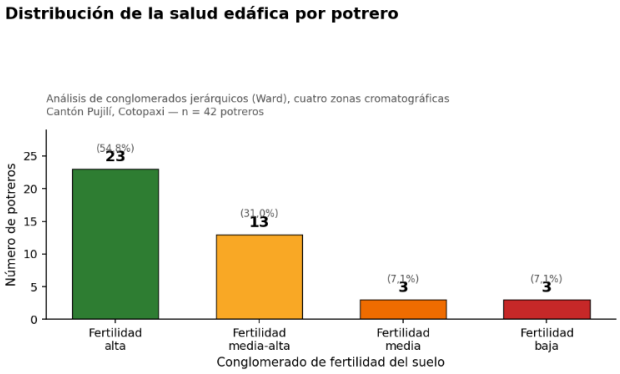
En la zona Externa también existen tres niveles posibles: Bajo, Medio y Alto. Aquí no apareció ninguna parcela en el nivel Alto. El gráfico muestra que casi todas las parcelas, 39 de las 42, quedaron agrupadas en el nivel Medio, mientras que solo 3 parcelas, que pertenecen a un mismo productor, se separaron por tener el nivel Bajo. Como la mayoría de las parcelas son parecidas entre sí en esta zona, esta variable aporta poca ayuda para distinguir tipos de suelo diferentes.

Figura 8. Dendrograma general del suelo



Este gráfico junta la información de las cuatro zonas del suelo (Central, Interna, Intermedia y Externa) en un solo análisis. Al hacerlo, las 42 parcelas quedaron divididas en cuatro grupos según su nivel de fertilidad: uno grande con fertilidad alta (23 parcelas), otro mediano con fertilidad media-alta (13 parcelas), y dos grupos pequeños con fertilidad media y baja (3 parcelas cada uno). Estos cuatro grupos son la base sobre la que se comparan más adelante la cantidad de pasto disponible y la producción de leche.

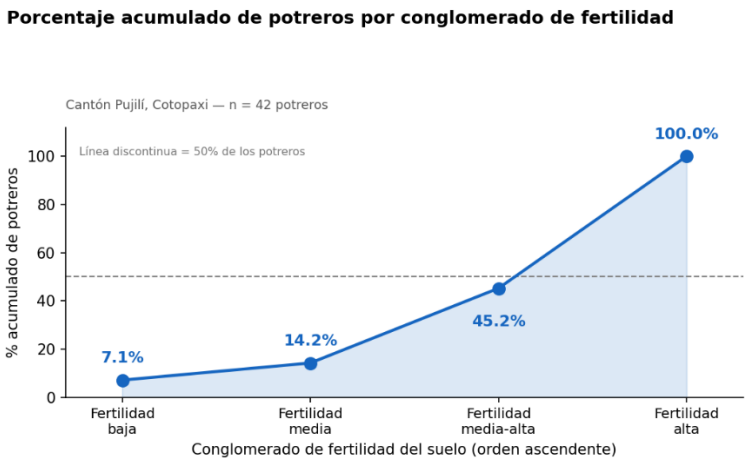
Figura 9. Distribución de la salud edáfica por potrero, cantón Pujilí (n = 42).



La distribución de los 42 potreros evaluados mediante cromatografía circular de Pfeiffer en el cantón Pujilí, reclasificados mediante el análisis de conglomerados jerárquicos (Ward), mostró una concentración marcada en el grupo de fertilidad alta. El 54,8 % de los potreros (n = 23) se clasificó en el Grupo 1 – Fertilidad alta, el 31,0 % (n = 13) en el Grupo 2 – Fertilidad

media-alta, y los grupos de Fertilidad media y Fertilidad baja representaron cada uno el 7,1 % (n = 3) de los potreros evaluados (Figura 5).

Figura 10. Porcentaje acumulado de potreros por conglomerado



La curva de porcentaje acumulado confirma esta concentración: el 7,1 % de los potreros se ubica en el grupo de menor fertilidad (Baja), el 14,2 % acumulado incluye adicionalmente el grupo de Fertilidad media, el 45,2 % se completa al incorporar el grupo de Fertilidad media-alta, y el 100 % se alcanza con la incorporación del grupo de Fertilidad alta. Es decir, más de la mitad de los potreros del cantón (54,8 %) presenta condiciones edáficas de fertilidad alta, mientras que solo un 14,2 % se ubica en los niveles medio y bajo combinados (Figura 6).(2 de cada 3 potreros no superan)

10.2.2. Resultados de análisis estadísticos disponibilidad de biomasa forrajera (MS) por conglomerado de suelo

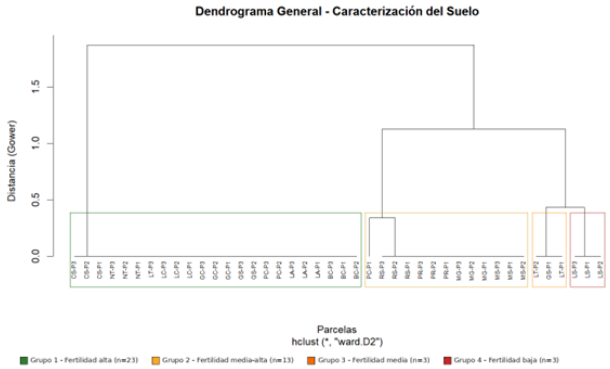
La Tabla 2 presenta los estadísticos descriptivos de la disponibilidad de MS en cada conglomerado.

Figura 11. Estadísticos descriptivos de MS (kg) por conglomerado de suelo

Conglomerado	N	Media	DE	Mínimo	Máximo
1	23	2,24	0,60	1,38	3,50
2	13	2,06	0,83	1,11	4,24
3	3	1,99	0,70	1,21	2,54
4	3	2,10	0,32	1,75	2,39

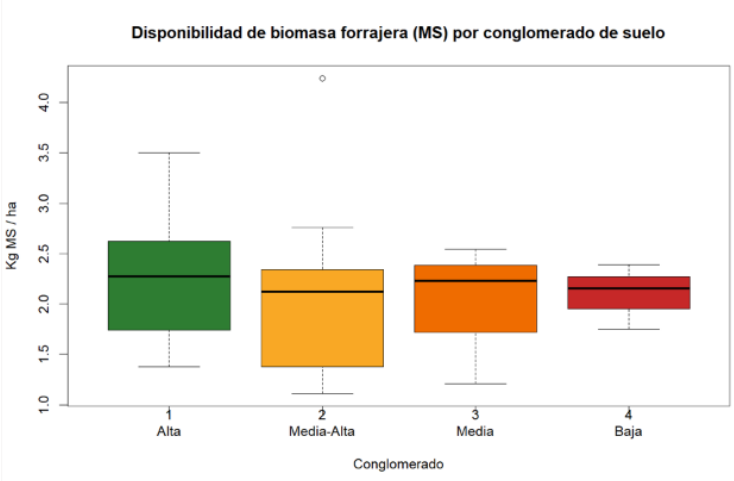
El damerograma resultante (Figura 11) mostró con claridad tres agrupaciones identificadas en relación a donde la distancia de fusión aumentaba de forma más marcada. Posteriormente estos grupos fueron caracterizados de acuerdo a la disponibilidad forrajera El primer clúster fue el que mostró mayor disponibilidad de forraje mientras que el segundo se caracterizó por menor disponibilidad de forraje y el tercer clúster se diferenció principalmente por presentar un mayor porcentaje de materia seca, asociado a un forraje de mayor madurez. Este conjunto permitió diferenciar los potreros en función de la disponibilidad y características del forraje lo que facilitó una interpretación más clara de su comportamiento productivo.

Figura 12. Dendograma General – Caracterización de Suelo



La prueba de Shapiro-Wilk mostró distribución normal en los Conglomerados 1 (p = 0,434), 3 (p = 0,429) y 4 (p = 0,726), pero no en el Conglomerado 2 (p = 0,050), lo que sustentó el uso de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Esta prueba **no evidenció diferencias estadísticamente significativas** en la disponibilidad de MS entre los cuatro conglomerados de suelo (χ^2 = 2,004; gl = 3; p = 0,572). Los gráficos de caja (Figura 6) y los QQ-plots de normalidad (Figura 7) respaldan visualmente estos resultados.

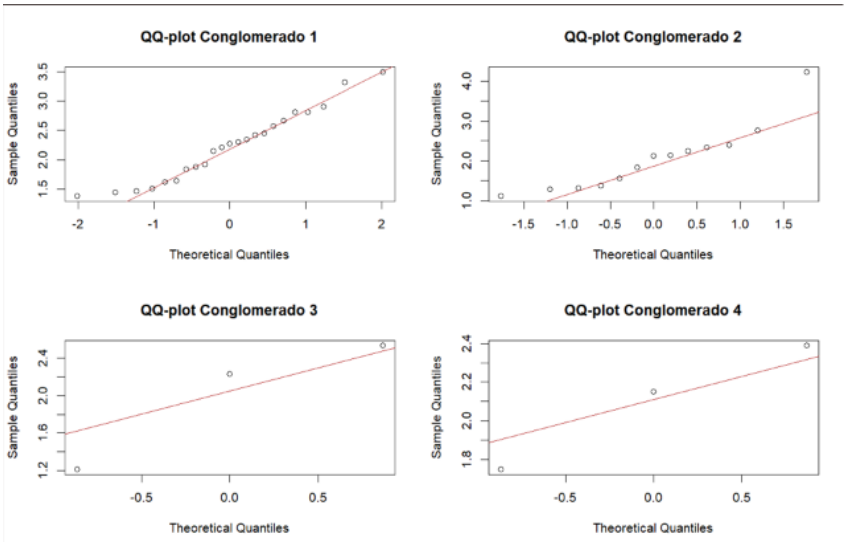
Figura 13. Biomasa forrajera por conglomerado.



Este gráfico de cajas compara cuánto pasto (materia seca) hay disponible en cada uno de los cuatro grupos de suelo. La línea del medio de cada caja marca el valor típico de cada grupo, y se nota que estos valores son muy parecidos entre sí, todos cerca de 2,1 a 2,3 kg . Además, las cajas se superponen bastante entre grupos, sin que se note una baja clara desde el

grupo más fértil hacia el menos fértil. Esto coincide con el resultado de la prueba estadística, que no encontró diferencias importantes entre los grupos.

Figura 14. QQ-plots de normalidad de la MS.



Estos cuatro gráficos muestran cómo se comportan los datos reales de cada grupo (los puntos) con una línea que representa cómo se verían esos datos si siguieran una distribución normal, es decir, un comportamiento estadístico esperado. En los Conglomerados 1, 3 y 4, los puntos siguen de cerca esa línea, lo que confirma que sus datos se comportan de forma normal. En cambio, en el Conglomerado 2 los puntos se alejan más de la línea, lo que muestra que sus datos no siguen ese patrón normal y por eso fue necesario usar una prueba estadística distinta para compararlo con los demás grupos.

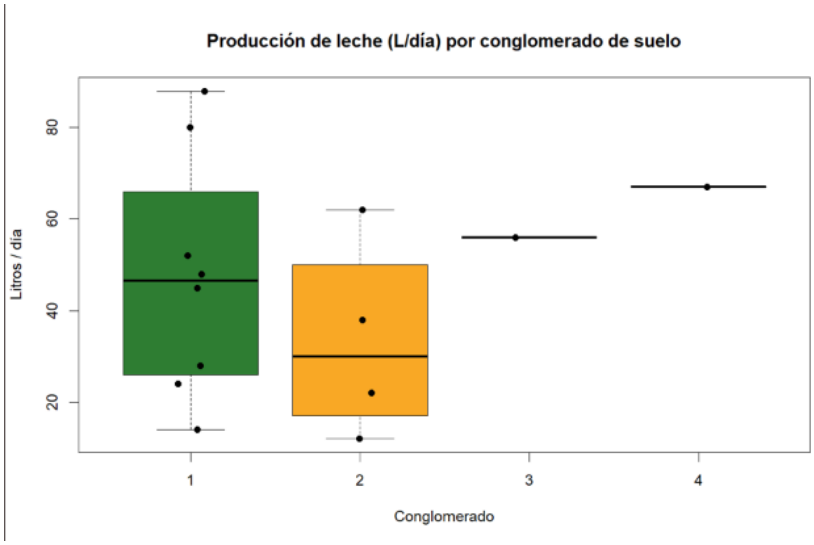
10.2.3. Resultados de análisis estadísticos Relación entre el conglomerado de suelo y la producción de leche

A nivel de productor (n = 14), la producción de leche presentó distribución normal (Shapiro-Wilk: W = 0,962; p = 0,763).

Respecto al conglomerado de suelo, la distribución de productores fue de 8 en el Conglomerado 1, 4 en el Conglomerado 2, y 1 productor en cada uno de los Conglomerados 3

y 4. La comparación entre los Conglomerados 1 y 2 mediante la prueba de Mann-Whitney no evidenció diferencias significativas en la producción de leche (W = 22; p = 0,368). Los Conglomerados 3 y 4 se presentan de forma descriptiva en la Figura 6, sin inferencia estadística, dado que están representados por un solo productor cada uno.

Figura 15. Producción de leche por conglomerado.



Este gráfico compara cuánta leche producen los productores de cada grupo de suelo. Solo se pudo comparar de forma estadística a los Conglomerados 1 y 2, ya que fueron los que tuvieron suficientes productores; los Conglomerados 3 y 4 se muestran solo como un punto, porque cada uno tiene un único productor. En el Conglomerado 1 la caja es más grande, lo que quiere decir que la producción varió bastante, entre 14 y 88 litros al día. En el Conglomerado 2 la producción varió menos. Aun así, no se encontró una diferencia importante entre ambos grupos, lo que se nota en que sus rangos de producción se superponen bastante.

10.2.4. Relación entre el conglomerado de suelo y la producción de leche

La comparación de la producción de leche entre conglomerados de suelo no evidenció diferencias significativas entre los grupos con representación muestral suficiente (Conglomerados 1 y 2; p = 0,368), lo que sugiere que la condición edáfica, por sí sola, no es un

factor determinante de la productividad lechera en las unidades evaluadas. No obstante, el marcado desbalance en el número de productores por conglomerado (8, 4, 1 y 1, respectivamente) constituye una limitación importante del estudio, que reduce la potencia estadística disponible para detectar diferencias reales entre grupos y restringe la posibilidad de generalizar estos resultados a una escala mayor.

10.3. Discusión de resultados

10.3.1. Caracterización de la salud edáfica

La clasificación de las 42 parcelas evaluadas mediante cromatografía circular de Pfeiffer permitió identificar cuatro conglomerados de fertilidad decreciente, concentrándose la mayoría de las unidades (54,8 %) en el de fertilidad alta, un 31,0 % en fertilidad media-alta y apenas un 14,2 % en los niveles medio y bajo, lo que sugiere que, en términos generales, los sistemas ganaderos del cantón Pujilí conservan condiciones favorables para el funcionamiento del suelo, entendido este como la interacción conjunta de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Hartmann & Six, 2023; Banerjee & van der Heijden, 2023); no obstante, el comportamiento diferenciado de las cuatro zonas cromatográficas evidencia que esta condición favorable no es homogénea ni está exenta de procesos de degradación. En la zona central se concentró la mayor variabilidad entre parcelas: si bien predominó el nivel alto, un 42,9 % se clasificó en nivel bajo, resultado que se atribuye principalmente al uso continuo de maquinaria agrícola y al pisoteo del ganado, factores que incrementan la densidad aparente, reducen la porosidad y limitan la infiltración de agua y el desarrollo radicular, coincidiendo con lo señalado por Shah et al. (2017) y Hartmann y Six (2023), quienes identifican la compactación como uno de los principales procesos de degradación física del suelo, al afectar simultáneamente sus propiedades físicas, químicas y biológicas; esta sensibilidad de la zona central para discriminar entre unidades productivas la convierte en un indicador clave para el diagnóstico físico del suelo. En contraste, la zona interna mostró una ausencia total de variabilidad (100 % en nivel alto), lo que indica

que, en el área de estudio, esta capa del perfil no aporta capacidad discriminante entre potreros, probablemente porque refleja procesos de mineralización profunda menos sensibles a las prácticas de manejo superficial como el paso de maquinaria; esto es consistente con lo planteado por Banerjee y van der Heijden (2023) respecto al papel de la diversidad microbiana en el mantenimiento de la fertilidad a través de la regulación de los ciclos de nitrógeno, fósforo y carbono. La zona intermedia, por su parte, presentó predominio del nivel medio, evidenciando que buena parte de la materia orgánica aún se encuentra en transición hacia humus estable, mientras que la zona externa —sin parcelas en nivel alto— reflejó limitaciones en la actividad microbiológica y enzimática, asociadas a bajos aportes orgánicos y a un manejo intensivo del suelo, en línea con lo descrito por Banerjee y van der Heijden (2023) y Hartmann y Six (2023) sobre la estrecha relación entre la degradación física del suelo y la reducción de su actividad biológica. En conjunto, estos resultados indican que la compactación derivada del tránsito de maquinaria y el pisoteo animal constituye el principal proceso de degradación física detectado, concentrado sobre todo en la zona central, y que esta zona, junto con la intermedia, resulta la más informativa para orientar futuros muestreos, ya que permitiría optimizar el diagnóstico de la salud edáfica sin necesidad de evaluar exhaustivamente las cuatro zonas del perfil cromatográfico

10.3.2. Relación entre suelo y disponibilidad de biomasa forrajera

La ausencia de diferencias estadísticamente significativas en la disponibilidad de biomasa forrajera entre los cuatro conglomerados de salud edáfica ($p = 0,572$) indica que, si bien se observó una tendencia descriptiva decreciente de materia seca desde el conglomerado de mejor salud edáfica hacia el de peor condición, esta tendencia no fue lo suficientemente marcada como para alcanzar significancia estadística, lo que sugiere que, en las condiciones evaluadas, la fertilidad del suelo no explicó por sí sola la producción registrada en los potreros. Este hallazgo se alinea con lo expuesto en la bibliografía sobre sistemas ganaderos familiares,

donde el manejo agronómico —fertilización, riego, especie forrajera establecida y frecuencia de corte o pastoreo— puede compensar las limitaciones naturales del suelo, homogeneizando la producción de biomasa entre unidades con distinta fertilidad edáfica de base; de hecho, potreros con diferente nivel de salud edáfica pueden presentar producciones similares cuando reciben un manejo agronómico adecuado, cuyo efecto sobre la productividad suele ser más evidente e inmediato que las diferencias naturales de fertilidad. A esto se suma la diversidad de especies forrajeras presentes en las unidades evaluadas —predominantemente alfalfa, en asociación con rye grass, trébol, llantén, avena y cebada—, cada una con requerimientos nutricionales y velocidades de crecimiento distintos, e incluso con capacidad de fijar nitrógeno atmosférico mediante simbiosis con *Rhizobium* en el caso de las leguminosas, lo que reduce su dependencia del nitrógeno edáfico y puede haber contribuido a atenuar las diferencias productivas entre conglomerados. Asimismo, las condiciones climáticas y el momento puntual de muestreo condicionan la interpretación de los resultados, ya que una evaluación realizada en un único periodo refleja el comportamiento del sistema en ese momento específico y no necesariamente el potencial productivo anual del suelo. Finalmente, debe considerarse una limitación metodológica relevante: los conglomerados de fertilidad media y baja estuvieron representados por muestras pequeñas —el conglomerado 3 con dimensiones similares, pero el conglomerado 4 sensiblemente más reducido—, lo que disminuye la potencia estadística de la prueba para detectar diferencias reales entre grupos si estas existieran; por ello, estos resultados deben interpretarse con cautela, no como evidencia de independencia entre la salud edáfica y la disponibilidad de biomasa forrajera, sino como una aproximación que sugiere que, durante el periodo evaluado, otros factores agronómicos y ambientales tuvieron mayor influencia sobre el rendimiento de las pasturas que las diferencias de fertilidad identificadas mediante cromatografía circular, siendo necesarios estudios futuros con mayor número de parcelas,

distintas épocas del año y variables complementarias de manejo para precisar esta relación en los sistemas lecheros del cantón Pujilí.

10.3.3. Relación entre los tipos de forraje utilizados

De los 42 potreros muestreados, la alfalfa en monocultivo fue el forraje predominante (27 potreros; 64,3 %), seguida por asociaciones gramínea-leguminosa como rey grass-alfalfa, rey grass-trébol y alfalfa-llantén (10 potreros; 23,8 %), y por gramíneas puras como avena, cebada y rey grass sin asociar (5 potreros; 11,9 %). Al observar estos tres grupos, se ve un claro gradiente en la cantidad de biomasa producida. Los potreros en monocultivo presentan en promedio más materia seca por m2 que los que están sembrados con asociaciones de dos especies. Además, alfalfa es el tipo con más rendimiento y las mezclas el de menor rendimiento, llegando a haber una diferencia cercana al 28% entre estas categorías. Este patrón se relaciona con el análisis de conglomerados de disponibilidad forrajera propio de este estudio (Tabla 11), donde el clúster con mayor disponibilidad estuvo presentado por potreros de alfalfa. Lo anterior sugiere que el tipo de siembra (monocultivo y mezcla) guarda relación con la disponibilidad forrajera. Por el contrario, la materia seca (indicador de madurez) fue similar en los tres grupos, lo que pone en evidencia que el forraje incide más sobre la cantidad de biomasa que sobre la madurez. Es de señalar que, salvo la alfalfa, los demás tipos están representados por pocos potreros (1 a 4), así que esta relación es un hallazgo descriptivo y no se trata de una diferencia probada estadísticamente.

10.3.4. Relación entre el conglomerado de suelo y la producción de leche

Las diferencias en la producción de leche entre los conglomerados de salud edáfica no fueron estadísticamente significativas ($W = 22$; $p = 0,368$), resultado que coincide con la ausencia de relación encontrada entre la salud del suelo y la biomasa forrajera (apartado 10.3.2). Esto sugiere que, en las condiciones evaluadas, la fertilidad del suelo por sí sola no explicó las variaciones en la producción de leche, debido a que esta depende de múltiples factores

zootécnicos y de manejo, como la alimentación y suplementación, la raza, los días en lactancia, el estado sanitario y el manejo reproductivo del hato, los cuales pueden ejercer una influencia más inmediata sobre la productividad que la condición edáfica (Roche et al., 2009; National Research Council [NRC], 2001). La amplia variabilidad observada dentro del conglomerado de mayor fertilidad, con producciones entre 14 y 88 litros por día, respalda esta interpretación al evidenciar que productores con condiciones de suelo similares pueden alcanzar niveles productivos muy diferentes. No obstante, estos resultados deben interpretarse con cautela debido a la marcada desproporción en el número de productores por conglomerado (8, 4, 1 y 1, respectivamente), lo que reduce el poder estadístico del análisis y limita la extrapolación de los resultados a todos los sistemas lecheros familiares del cantón Pujilí.

11. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)

La aplicacion de la cromatografía de Pfeiffer en el presente estudio tiene impacto técnico social ambiental y económico. Se considera que un instrumento técnico de bajo costo que permite diagnosticar la calidad de suelos y que puede ser aplicado por productores, técnicos y alumnos mediante procedimientos de fácil realización, favorece la utilización del mismo en sistemas productivos de pequeña y mediana escala. (Cruz et al., 2023) Igualmente, fomenta el desarrollo de las capacidades de los productores al proporcionarles información que favorece el análisis y la toma de decisiones sobre el uso de sus suelos. Desde una perspectiva ambiental, permite identificar a tiempo aquellas áreas que requieren prácticas de conservación y manejo sustentable lo que contribuye a preservar la calidad del recurso suelo. Finalmente, en el ámbito económico un mejor manejo del suelo favorece la producción de forraje lo que optimiza el desempeño de los sistemas ganaderos y contribuye a mejorar la rentabilidad de las unidades de producción ya que estos aspectos están estrechamente relacionados con la salud y calidad del suelo (Bünemann et al., 2018).

12. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Tabla 15. *Presupuesto del proyecto de investigación.*

Material	Cantidad	Unidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Gastos de campo				
Pasajes	5	Día	20,00	**100,00**
Fundas herméticas	1	Paquete	6,00	**6,00**
Guantes (Oz)	1	Unidad	2,00	**2,00**
Costales	30	Paquete	18,00	**18,00**
Gastos de laboratorio				
Nitrato de plata ($AgNO_3$)	1	Frasco	55,00	**55,00**
Cajas Petri	6	Unidad	2,00	**12,00**
Papel filtro N.º 4	9	Rollo	2,00	**18,00**
Papel aluminio	1	Rollo	2,50	**2,50**
Papel toallas	2	Paquete	1,50	**3,00**
Resma de papel bond	1	Resma	4,50	**4,50**
Jeringuillas	2	Unidad	0,30	**0,60**
Masking	1	Rollo	0,60	**0,60**
Marcador permanente	1	Unidad	0,75	**0,75**
Alcohol	1	Frasco	6,00	**6,00**
Compás	1	Unidad	2,00	**2,00**
Subtotal gastos de laboratorio				**104,95**
TOTAL				**230,95**

Elaborado por: (Mariscal, 2026)

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La cromatografía circular de Pfeiffer permitió caracterizar la salud edáfica de las parcelas de los 14 productores vinculados al proyecto DIRGI_CP2021-003 evidenciando que la mayoría de los suelos evaluados se ubica en una condición intermedia con un equilibrio mineral aceptable y actividad biológica moderada a moderada-baja por otro lado un grupo más reducido presenta baja actividad microbiológica mientras que otro muestra una mejor diferenciación de zonas y fertilidad biológica media-alta.

Los datos de biomasa forrajera recolectados (rango aproximado de 147 a 424 g MS/m², con 18 a 19,5% de materia seca) muestran variaciones entre unidades productivas que son coherentes con las diferencias observadas en los cromatogramas.

La producción de leche entre las unidades productivas evaluadas mostró una variabilidad considerable ya que presenta producción total que osciló entre 12,0 y 88,0 L/día y una productividad por hectárea de entre 9,89 y 86,67 L/día/ha. Esta dispersión evidencia que la producción lechera en el cantón Pujilí está condicionada por múltiples factores simultáneos de manejo zootécnico que superan la influencia de la salud edáfica del suelo .

Recomendaciones

Incorporar en futuras investigaciones el registro de variables zootécnicas como la raza, los días en lactancia y el nivel de suplementación dado que estas variables mostraron ser determinantes principales de la producción lechera en el cantón Pujilí.

Priorizar la implementación de prácticas de recuperación de suelo como la rotación de potreros, la reducción de la carga animal y uso de abonos orgánicos en las parcelas identificadas con baja actividad microbiológica dando así seguimiento a la evolución de estos suelos en próximas temporadas.

Ampliar el tamaño de muestra en futuras investigaciones incorporando más unidades productivas del cantón esto con el fin de fortalecer la robustez estadística de la relación entre salud edáfica la biomasa forrajera y sostenibilidad económica.

14. BIBLIOGRAFÍA

Azeze, T., Eshetu, M., Yilma, Z., & Berhe, T. (2024). Typification and differentiation of smallholder dairy production systems in smallholder mixed farming in the highlands of southern Ethiopia. *PLOS ONE*, *19*(8), e0307685. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307685

Bachhav, Mr. R., Bachhav, Mr. P., Sonawane, V., Sonawane, G., & Bhamare, M. (2024). A Brief Review on Different Chromatographic Techniques. Open Access Journal of Pharmaceutical Research, Volume 8, 000294.

Barros, C. E., & Silveira Franco, F. (2022). Contribuciones de la cromatografía circular de Pfeiffer en el análisis de la salud del suelo. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 31(2), 395–413. https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.90067

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry, 120, 105-125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030

Castillo-Valdez, X., Etchevers-Barra, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: Generación e interpretación de indicadores. REVISTA TERRA LATINOAMERICANA, 39. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698

Centeri, C. (2022). Effects of Grazing on Water Erosion, Compaction and Infiltration on Grasslands. Hydrology, 9(2), 34. https://doi.org/10.3390/hydrology9020034

Cevallos Polanco, G., Molina Peñafiel, D., & Villacís Núñez, G. (2021). Costo real de producción del litro de leche en pequeños ganaderos de Sivicusig, Sigchos. Ciencia

Latina Revista Científica Multidisciplinar, 5(4), 4474–4489. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.632

Chanalata, D. J. B. (2023.). DECLARACIÓN DE AUTORÍA.

Cochancela, C. A. C., & Alvarado, M. B. O. (2025). Factores influyentes en los costos de producción de leche en la Asociación Lagunas de Mesarrumi. Revista Científica Internacional, 8(1), 1-17. https://doi.org/10.46734/revcientifica.v8i1.114

Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Rodríguez-Vitola, J. L., Barragán-Hernandez, W., & Garrido-Pineda, J. (s. f.). Índice de Calidad del Suelo Bajo Sistemas Agropecuarios en el Bosque Seco Tropical-Colombia Soil Quality Index for Agricultural Systems in the Tropical Dry Forest-Colombia. . . e.

Cruz, M., et al. (2023). Calidad del suelo estimada mediante técnica de bajo costo: La cromatografía Pfeiffer como herramienta para la evaluación en agricultura familiar. Revista Valore, 8(Edición especial), 85–102. https://www.researchgate.net/publication/389882000

Cruz, S. N. da, Ferreira, Z. N., Silva, C. D. T., Santos, J. B. dos, Oliveira, M. V. de, Araújo, W. de O., Santos, M. E. S. dos, Vilela, L. V., Rigotti, R., Alvares, A. E. da S., Emerick, H. F., Oliveira, I. A. de, Polese, V., Freitas, L. de, & Felix, M. A. de O. (2023). QUALIDADE DO SOLO ESTIMADA POR TÉCNICAS DE BAIXO CUSTO: CROMATOGRAFIA DE PFEIFFER COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO AGRÍCOLA E AMBIENTAL DE SOLOS NA AGRICULTURA FAMILIAR. Revista Valore, 8, 85-102. https://doi.org/10.22408/reva802023125585-102

Cáceres, O., & González García, E. (2000). Metodología para la determinación del valor nutritivo de los forrajes tropicales. Pastos y Forrajes, 23(2), 87–103. https://hal.science/hal-01190063

Cevallos Polanco, A., Taipe Taipe, M. V., & Caiza de la Cueva, F. I. (2021). Costo real de producción del litro de leche, en pequeños ganaderos de la comunidad de Sivicusig, cantón Sigchos, Ecuador. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 5(4), 4474–4489. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.632

Domingues, S., Boff, P., & Boff, M. I. C. (2022). Cromatografía circular Pfeiffer en suelo tratado con altas diluciones dinamizadas. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13(7), 1183-1194. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3172

Dunkl, I., & Ließ, M. (2022). On the benefits of clustering approaches in digital soil mapping: An application example concerning soil texture regionalization. *SOIL*, *8*(2), 541–558. https://doi.org/10.5194/soil-8-541-2022

El sector ganadero sufre las consecuencias de la sequía. (2024). ECUAVISA. https://www.ecuavisa.com/ecuador/el-sector-ganadero-sufre-las-consecuencias-de-la-sequia-20240905-0059.html

En Ecuador, La Crisis Del Pasto Afectó La Producción De Leche De Pequeños Ganaderos—EDairyNews Español. (2024, octubre 7). https://es.edairynews.com/en-ecuador-produccion-de-leche/

Fasciculo_Pujili.pdf. (2023.). https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Fasciculos_Censales/Fasc_Cantonales/Cotopaxi/Fasciculo_Pujili.pdf

Franco-Crespo, C., Muñoz, M., & Veloz, A. (2019). Dinámica de los pequeños productores de leche en la Sierra centro de Ecuador. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, 30(2), 103–118. https://doi.org/10.17163/lgr.n30.2019.09

Hernández, D., et al. (2025). Evaluación de la calidad biológica del suelo en sistemas citrícolas mediante cromatografía de Pfeiffer. Wani. https://revistas.bicu.edu.ni/index.php/wani/article/view/1039

Impacto de la Salud del Suelo en la Sostenibilidad Agrícola. (2023). Recuperado 26 de mayo de 2026, de https://biomemakers.com/es/blog/como-afecta-la-salud-del-suelo-a-la-sostenibilidad-de-la-explotacion-y-a-su-rentabilidad

Indicadores de salud del suelo: Claves para un cultivo exitoso y sostenible. (2022). Plataforma Tierra. Recuperado 26 de mayo de 2026, de https://www.plataformatierra.es/innovacion/indicadores-salud-del-suelo-claves-cultivo-exitoso-sostenible

Inicio. (2018.). Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Cotopaxi., dehttps://cotopaxi.gob.ec/

Jurado-Guerra, P., Velázquez-Martínez, M., Sánchez-Gutiérrez, R. A., Álvarez-Holguín, A., Domínguez-Martínez, P. A., Gutiérrez-Luna, R., Garza-Cedillo, R. D., Luna-Luna, M., & Chávez-Ruiz, M. G. (2021). Los pastizales y matorrales de zonas áridas y semiáridas de México: Estatus actual, retos y perspectivas. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 12(Supl. 3), 261–285. https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5875

Kroeger, C. M., Hannon, B. A., Halliday, T. M., Ejima, K., Teran-Garcia, M., Brown, A. W., Wilcox, R. R., & Krause, J. (2021). Evidence of misuse of nonparametric tests in the presence of heteroscedasticity within obesity research. *F1000Research, 10*, Article 396. https://doi.org/10.12688/f1000research.52693.1

Liu, P., Yuan, H., Ning, Y., Liu, N., & Peres, M. A. (2024). A modified and weighted Gower distance-based clustering analysis for mixed type data: A simulation and empirical analyses. *BMC Medical Research Methodology, 24*, Article 305. https://doi.org/10.1186/s12874-024-02427-8

Lácteos | Centro de la Industria Láctea | Ecuador. (2025.). Centro de la Industria Láctea., https://www.cil-ecuador.org

Maharjan, B., Das, S., Thapa, V. R., & Sharma Acharya, B. (2024). Soil health cycle. Agrosystems, Geosciences & Environment, 7(2), e20504. https://doi.org/10.1002/agg2.20504

Manejo de praderas uno de los factores críticos para la sostenibilidad de la producción lechera. (2024, octubre 17). Diario Lechero. https://www.diariolechero.cl/noticia/actualidad/2024/10/manejo-de-praderas-uno-de-los-factores-criticos-para-la-sostenibilidad-de-la-produccion-lechera

Medina Pinoargote, G. E., Pereda Mouso, J. J., Curbelo Rodríguez, L. M., Medina Pinoargote, G. E., Pereda Mouso, J. J., & Curbelo Rodríguez, L. M. (2024). Producción de leche en Ecuador, su proyección a partir de escenarios con énfasis en la cuenca baja del Guayas. Revista de Producción Animal, 36(1), 38-56.

Medina Saavedra, T., Arroyo Figueroa, G., & Peña Caballero, V. (2018). Cromatografía de Pfeiffer en el análisis de suelos de sistemas productivos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 9(3), 665–673. https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1218

Méndez Vinueza, D. N. (2021). Evaluar diferentes métodos de determinación de biomasa de mezclas forrajeras [Trabajo de titulación, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Institucional UCE. https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/059c552f-6fb0-402f-9d72-93177bb9bd60

Mendoza, G. L. V. (2024.). De la comuna de Joá del cantón de jipijapa, 2024.

Mendoza, J. E. G., Zambrano, M. B. Z., & Bowen, J. L. R. (2025). Efectos de intensidades de pastoreo sobre la humedad del suelo. Polo del Conocimiento, 10(6), 2868-2882. https://doi.org/10.23857/pc.v10i6.9850

Montatixe Sánchez, C. I., & Eche Enríquez, M. D. (2021). Degradación del suelo y desarrollo económico en la agricultura familiar de la parroquia Emilio María Terán, Píllaro. Siembra, 8(1). https://doi.org/10.29166/siembra.v8i1.2638

Naranjo Guilcaso, K. F. (2024). Evaluación de animales en base a caracteres de importancia económica en la producción de leche en parroquias de Pujilí [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Cotopaxi. https://repositorio.utc.edu.ec/items/45835488-ed6d-4409-adc2-d60426a1ee2d

Ofelia Adriana Hernández Rodríguez. Damaris Leopoldina Ojeda Barrios. Graciela Dolores Avila Quezada. (2025). Destacado papel de la cromatografía circular de Pfeiffer en el análisis integral de suelos y abonos orgánicos. https://spauach.uach.mx/revista_spauach/articulo/59

Peña-Avelino, L. Y., Alva Pérez, J., Rosales Martínez, G. N., Hernández Contreras, S., & Ceballos Olvera, I. (2024). Estrategias de nutrición y alimentación para reducir las emisiones de metano en rumiantes bajo sistemas pastoriles: Una revisión. Ciencias Veterinarias y Producción Animal, 1(2), 60-73.

Portal de conocimiento ::Inicio. (2026). de https://openknowledge.fao.org/home

Primicias. (2022, 15 de mayo). Productores de Cotopaxi, en alerta por abigeato y bajos precios de la leche. https://www.primicias.ec/noticias/economia/productores-cotopaxi-alerta-abigeato-bajos-precios-leche-ecuador/

Publiagro. (2026, junio 9). Publiagro. https://publiagro.com.bo/

Polanía-Hincapié, K. L., Olaya-Montes, A., Cherubin, M. R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Morea, F. A., & Silva-Olaya, A. M. (2021). Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. Geoderma, 386, 114900. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900

Public file share—Nextcloud—Nube GADPC. (2025 https://nube.cotopaxi.gob.ec/index.php/s/djnj7AW3WEaNftj?dir=/&editing=false&openfile=true

Quijano-Cuervo, L. G., Robledo-Ospina, L. E., García Hernández, L. F., & Escobar Sarria, F. (2021). Arañas: Tejiendo un eslabón crucial para el equilibrio de los agroecosistemas. Revista Digital Universitaria, 22(3). https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2021.22.3.5

Relación calcio, fosforo, magnesio y selenio sobre la reproducción en vacas lecheras durante el periodo de transición. (2021.). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2027-42972021000200072

Repositorio DSpace: Inicio. (2022.). https://repositorio.iniap.gob.ec/home

Restrepo Rivera, J., & Pinheiro, S. (2011). Cromatografía: Imágenes de vida y destrucción del suelo. COAS Editores. https://morralcampesino.files.wordpress.com/2016/03/cromatografia-restrepo-pinheiro.pdf

Rodríguez-Delgado, I., Martín-Martín, G., Pérez-Iglesias, H., & Garcia Batista, R. (2025). Comportamiento de propiedades físicas, químicas y biológica del suelo en sistemas de producción agrícola. Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 8, 184-196. https://doi.org/10.62452/se591c34

Restrepo-Rivera, J. E., & Pinheiro, S. (2011). Agricultura orgánica: La teoría de la trofobiosis y las cromatografías de Pfeiffer. Bogotá: PRV Editores. https://books.google.com/books/about/Cromatograf%C3%ADa.html?id=wdXMjgEACAAJ

Schweizer Lassaga, S. (2011). Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica https://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/08/00428-muestreoyanalisisdesuelos.pdf

Sector lácteo en Ecuador: Una mirada a los desafíos y oportunidades. (2024, junio 11). https://revistagestion.primicias.ec/analisis-economia-y-finanzas/sector-lacteo-en-ecuador-una-mirada-los-desafios-y-oportunidades/

Taipe, M. V. T., Guambi, L. A. D., Solorzano, J. A. S., Hidrovo, C. A. M., Tito, Z. L., Cueva, F. I. C. de la, & Méndez, J. A. A. (2022). Realidades de la ganadería bovina en la provincia de Manabí. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6(4), 311-338. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2588

Taipe, M., Duicela, L., Solorzano, J., Molina, C., Zambrano, T., Caiza, F. y Aranguren, J. (2022). Realidades de la ganadería bovina en la provincia de Manabí. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6(4), 311–338. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.258

Universidad Politécnica Estatal del Carchi. (2023). Comparación de técnicas de agricultura de precisión y convencionales en la medición de biomasa en mezclas forrajeras en el Centro Experimental San Francisco-UPEC. Repositorio Institucional UPEC. https://repositorio.upec.edu.ec/handle/123456789/2897

Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). The nature and properties of soils (15.ª ed.). Pearson. https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition