



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE AGROPECUARIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y LA
PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA
FAMILIAR EN PUJILÍ”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingeniero Agropecuario

Autor:

Mallitasig Valarezo Galo Leandro

Tutor:

Molina Cuasapaz Edie Gabriel

LATACUNGA – ECUADOR

Marzo 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Mallitasig Valarezo Galo Leandro, con cédula de ciudadanía No. 0503804171, declaro ser autor del presente Proyecto de Investigación: **“RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA FAMILIAR EN PUJILÍ”**, siendo el Medico Vetrinario Zootecnista 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, 19 de febrero del 2026

Galo Leandro Mallitasig Valarezo

C.C: 0503804171

ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **MALLITASIG VALAREZO GALO LEANDRO**, identificado con cédula de ciudadanía **0503804171** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL 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. - **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Agropecuaria, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA FAMILIAR EN 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: Abril 2022 - Agosto 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Mvz. Edie Gabriel Molina Cuasapaz, Mtr.

Tema: **“RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA FAMILIAR EN 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, **EL 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 **EL 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.

f) **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 **EL 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 **EL 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 **EL 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 19 días del mes de febrero del 2026.

Galo Leandro Mallitasig Valarezo
EL CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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

“RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA FAMILIAR EN PUJILÍ”, de Mallitasig Valarezo Galo Leandro, 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, 19 de febrero 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, el postulante: Mallitasig Valarezo Galo Leandro, con el título del Proyecto de Investigación: **“RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA FAMILIAR EN 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, 19 de febrero del 2026

Ing. Juan Tapia Molina, Mg.
C.C: 0503480154
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Mvz. Alison Simancas Racines, Mg.
C.C: 0503001000
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Clever Castillo de la Guerra, Mg.
CC: 0501715494
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

A Dios, por su infinito amor y generosidad, por concederme salud, sabiduría e inteligencia, y por colmar mi vida de bendiciones. Por guiar cada paso de mi camino, brindándome fortaleza y apoyo en los momentos de dificultad, y por permitirme culminar con éxito este importante proyecto de investigación.

A mis padres, Walter y Raquel, por ser el pilar fundamental de mi formación personal y académica. Gracias por creer en mí, por impulsar mis sueños y acompañarme incondicionalmente con su amor, esfuerzo y sacrificio. Los valores, principios y enseñanzas que me han transmitido han sido esenciales para alcanzar esta meta.

Galo Leandro Mallitasig Valarezo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía permanente y no abandonarme en ningún momento del camino. Por darme la fortaleza necesaria para superar cada dificultad, iluminar mis decisiones y permitirme avanzar con fe y confianza. Gracias por poner en mi vida a personas que fueron apoyo y sustento durante mi formación académica, y por concederme la oportunidad de culminar este importante proyecto de investigación.

A mis padres, Walter y Raquel, por su amor incondicional, paciencia y esfuerzo constante. Gracias por ser el pilar fundamental de mi vida, por creer en mis capacidades y enseñarme con su ejemplo el valor del trabajo, la responsabilidad y la valentía. Sus consejos, sacrificios y principios han sido fundamentales para no rendirme ante las adversidades y para alcanzar este sueño que hoy se hace realidad.

De manera especial, dedico este trabajo a mi enamorada Nayely, por su apoyo incondicional, comprensión y acompañamiento constante a lo largo de este proceso. Gracias por tu paciencia, palabras de aliento y motivación en los momentos de cansancio y dificultad. Tu confianza en mí y tu presencia han sido un impulso importante para seguir adelante y culminar con éxito esta etapa de mi vida académica.

Galo Leandro Mallitasig Valarezo

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN LECHERA FAMILIAR EN PUJILÍ”.

Autor:

Mallitasig Valarezo Galo Leandro

RESUMEN

Dentro del cantón Pujilí (Cotopaxi) los sistemas de producción lechera familiar dependen de la calidad de los forrajes, los cuales se desarrollan sobre suelos cuyas propiedades físicas han sido perjudicadas por prácticas inadecuadas de manejo como el sobrepastoreo, el tránsito continuo de animales y la falta de rotación de potreros, ocasionando procesos de compactación y deterioro de la calidad del suelo, agregando la escasa información técnica local que impide la toma de decisiones para tener un manejo sostenible; en este contexto, la presente investigación, de enfoque cuantitativo y descriptivo, evaluó la relación entre la textura del suelo (predominantemente franco arenoso con un 90%), densidad aparente, porosidad e infiltración del agua con la producción de biomasa forrajera en 39 unidades productivas lecheras familiares, mediante análisis estadísticos descriptivos e inferenciales, añadiendo correlaciones y análisis de componentes principales, encontrándose valores promedio de densidad aparente de $1,04 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$, infiltración de $21,31 \pm 2,75 \text{ mm/h}$ y porosidad de $22,88 \pm 3,03 \%$, así como una biomasa promedio de $2225,24 \pm 575,55 \text{ kg/ha}$, evidenciando una productividad moderada, donde el análisis multivariado determinó que la biomasa forrajera constituye el principal factor diferenciador entre los sistemas evaluados y que la densidad aparente y la porosidad contribuyen de manera significativa en el rendimiento forrajero concluyéndose que el manejo adecuado del suelo es decisivo para mejorar la producción de forrajes en base al funcionamiento sostenible de los sistemas productivos lecheros familiares por lo que se recomienda la implementación y lineamientos para el uso racional y protección del suelo.

Palabras clave: propiedades físicas del suelo, producción de forrajes, biomasa forrajera, sistemas lecheros familiares.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

THEME: “RELATIONSHIP BETWEEN SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND FORAGE PRODUCTION IN FAMILY DAIRY PRODUCTION SYSTEMS IN PUJILÍ.”

Author:
Mallitasig Valarezo Galo Leandro

ABSTRACT

In the Pujilí canton, Cotopaxi province, family dairy production systems depend on the quality of forage, which is grown on soils whose physical properties have been damaged by inappropriate management practices such as overgrazing, continuous animal traffic, and lack of pasture rotation, causing soil compaction and deterioration. This is compounded by the scarcity of local technical information, which hinders decision-making for sustainable management. In this context, this quantitative and descriptive study evaluated the relationship between soil texture (predominantly sandy loam, 90%), bulk density, porosity, and water infiltration with forage biomass production in 39 family dairy farms, using descriptive and inferential statistical analyses, adding correlations and principal component analyses. Finding average values of bulk density of 1.04 ± 0.08 g/cm³, infiltration of 21.31 ± 2.75 mm/h, and porosity of $22.88 \pm 3.03\%$, as well as an average biomass of 2225.24 ± 575.55 kg/ha, showing moderate productivity, where multivariate analysis determined that forage biomass is the main differentiating factor between the systems evaluated and that bulk density and porosity contribute significantly to forage yield, concluding that proper soil management is crucial for improving forage production and the sustainability of family dairy production systems, and therefore recommending the implementation of conservation practices and sustainable soil management.

KEYWORDS: Physical properties of soil, Forage production, Forage biomass, family dairy systems.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	v
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA.....	viii
RESUMEN	ix
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	xi
Índice De Tablas	xiv
Índice De Figuras	xv
1. Información General.....	1
2. Justificación del Proyecto.....	2
3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO:	2
3.1. Directos:	2
3.2. Indirectos	3
4. El Problema de Investigación.....	3
5. Objetivos	4
5.1. Objetivo general:	4
5.2. Objetivos específicos:.....	4
6. Actividades y Sistema de Tareas en Relación a los Objetivos Planteados	4
7. Fundamentación Científica Técnica.....	5
7.1. El Suelo Como Recurso Productivo En Sistemas Agropecuarios.....	5
7.2. Importancia del Suelo en la Producción Agrícola Y Pecuaria	6
7.3. Características de los Sistemas Lecheros Familiares	6
7.4. Importancia Socioeconómica de la Producción Lechera	7
7.4.1. Familiar en Zonas Rurales.....	7

7.5.	Concepto e Importancia de las Propiedades Físicas del Suelo.....	8
7.6.	Textura del Suelo.....	8
7.7.	Densidad Aparente	9
7.8.	Porosidad Del Suelo	10
7.9.	Infiltración y Retención de Humedad	11
7.10.	Compactación del Suelo por Pisoteo Animal.....	12
7.11.	Concepto de Biomasa Forrajera	13
7.12.	Materia Verde y Materia Seca.....	15
8.	Hipótesis.....	16
9.	Metodología del Proceso de Investigación Según Enfoque.....	16
9.1.	Propiedades físicas del suelo.....	16
9.1.1.	Textura del Suelo	16
9.1.2.	Densidad Aparente	17
9.1.3.	Infiltración de agua.....	18
9.1.4.	Porosidad.....	18
9.1.5.	Biomasa.....	18
9.2.	Interpretación de Resultados:	18
9.2.1.	Diseño del estudio	18
9.2.2.	Selección de zonas de estudio	19
9.2.3.	Caracterización de las propiedades físicas del suelo.....	19
9.2.4.	Evaluación de la producción de forraje.....	19
9.2.5.	Análisis estadístico.....	19
10.	Resultados	20
10.1.	Discusión.....	25

11. Conclusión	29
12. Recomendación	30
13. BIBLIOGRAFÍA	31

Índice De Tablas

Tabla 1. Participación del ganado bovino según disponibilidad de biomasa forrajera en Ecuador	14
Tabla 2. Caracterización estadística descriptiva de propiedades físicas y biomasa del suelo. 20	
Tabla 3. Análisis inferencial de variables del suelo en el Productor 3	22
Tabla 4. Relación estadística entre indicadores físicos y biomasa del suelo del Productor 3 .23	
Tabla 5. Análisis de componente principales	23
Tabla 6. Cargas definidas por cada componente principal	24

Índice De Figuras

Figura 1. Textura del suelo.....	8
Figura 2. Determinación de la estructura del suelo	17
Figura 3. Relación estadística entre indicadores físicos y biomasa del suelo	21
Figura 4. Relación entre biomasa forrajera (kg/ha) y producción de leche (kg/lactancia).....	24

1. Información General

Título del Proyecto:

Relación entre las propiedades físicas del suelo y la producción de forrajes en sistemas de producción lechera familiar en Pujilí.

Fecha de inicio: octubre 2025

Fecha de finalización: marzo 2026

Lugar de ejecución: Pujilí - Cotopaxi

Unidad Académica que auspicia:

Universidad Técnica de Cotopaxi

Carrera que auspicia: Ingeniería Agropecuaria

Proyecto de investigación vinculado:

Estudio de adaptación de siete pastos y tres mezclas forrajeras con la utilización de lactofermento en la comunidad de san isidro, parroquia la matriz, cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi.

Equipo de Trabajo:

Tutor: Mvz. Edie Gabriel Molina Guasapaz, Mtr. (Anexo 2)

Estudiante: Galo Leandro Mallitasig Valarezo (Anexo 3)

Área de Conocimiento:

Ciencias Agropecuarias, Ciencias Veterinarias.

Línea de investigación:

Manejo sostenible del suelo y productividad forrajera en sistemas agropecuarios familiares

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Propiedades físicas de suelo y rendimiento de pasturas, degradación y recuperación físicas en sistemas ganaderos

2. Justificación del Proyecto

La producción lechera familiar ayuda a una actividad económica y social de una gran importancia en el cantón de Pujilí, representando una fuente principal de ingresos y sustentos para numerosas familias de los diferentes sectores. La base de estos sistemas productivos es la calidad y disponibilidad de los forrajes, los cuales dependen de las condiciones del suelo donde se desarrollan. Los parámetros físicos del suelo son factores los cuales influyen en el crecimiento de las diferentes especies forrajeras y en la productividad de sistema lechero.

En diferentes predios lecheros familiares de Pujilí existen diferentes problemas asociados al manejo inadecuado del suelo, tales como compactación, baja porosidad, deficiencia de infiltración de agua y una limitación de retención de humedad, causas que perjudican al rendimiento forrajero. Sin embargo, hay una escasez de estudios locales que estudien de manera específica el vínculo existente entre los atributos físicos del suelo y la producción forrajera en múltiples condiciones edafoclimáticas propias del sector.

El proyecto de investigación se fundamentó a partir del sustento teórico científico, dado que ayudara a obtener información técnica local sobre la conducta de los suelos e influjo en la producción de forrajes, aportando el discernimiento en el área agropecuaria sostenible. Desde un punto de vista productivo y asequible, los resultados ayudaran a establecer limitantes físicas del suelo y plantear prácticas de manejo que mejoren la productividad de los forrajes, disminuyendo los costos de alimentación del ganado y de esa manera tener más eficacia en los sistemas de producción lechera familiar.

De igual forma, la investigación presenta una relevante justificación social y ambiental, ya que permitirá fomentar practicas orientadas al manejo sustentable del suelo, la preservación de sus características físicas y el fortalecimiento de la rentabilidad de los pequeños sistemas de producción lechera. Los hallazgos obtenidos conformaran un insumo fundamental para el diseño de estrategias de capacitación, asistencia técnica y elemento de soporte para la gestión de decisiones en el contexto local, contribuyendo así al impulso del desarrollo rural sostenible en el cantón Pujilí.

3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO:

3.1. Directos:

- Productores inscritos en el Proyecto
- Indagador

3.2. Indirectos

- Estudiantes de la carrera de Ingeniería Agropecuaria
- Productores del canto Pujilí.

4. El Problema de Investigación

Dentro del cantón Pujilí (Cotopaxi), los sistemas de producción lechera familiar constituyen una de las principales actividades agropecuarias. Según (Bravo, 2023) a base de los lineamientos de planificación territorial y desarrollo el 58,8% respecto a la población en Pujilí se dedica a actividades del sector primario (agricultura, ganadería y silvicultura), cuya sostenibilidad productiva depende en gran medida de la disponibilidad y la calidad de forrajes utilizado para la alimentación de ganado bovino. Estos forrajes tienen un desarrollo sobre suelos que presentan características variables, determinadas tanto por condiciones naturales como por las prácticas de manejo aplicada por los productores.

Las propiedades físicas del suelo, tales como la textura, densidad aparente, porosidad, estructura, infiltración y contenido de humedad, condicionan el desarrollo radicular de las plantas forrajeras, la disponibilidad de agua y la aireación del suelo. No obstante, en los sistemas de producción lechera familiar de Pujilí se ha identificado practicas inadecuadas, como el sobrepastoreo, el transito continuo de animales, la ausencia de rotación de potreros y la limitada aplicación de prácticas de conservación del suelo que han traído consigo consecuencias de procesos de compactación y deterioro de su calidad física (Romero, 2023).

A pesar de la importancia que tiene el suelo como un componente fundamental del sistema productivo, en la zona no se dispone de información técnica sistematizada que describa el estado actual de las propiedades físicas del suelo ni la producción forrajera en sistemas de producción lechera familiar. Esta falta de información dificulta la comprensión de las condiciones edáficas bajo las cuales se desarrollan las pasturas y limita el proceso de decisiones que son dirigidas a una gestión adecuado de suelo y al mejoramiento de la producción forrajera.

En este contexto, surge como una necesidad realizar una investigación de carácter descriptivo que permita caracterizar los parámetros físicos del suelo para describir la producción forrajera en los sistemas de producción lechera familiar del cantón Pujilí, generando información técnica local que sirva como base para futuras investigaciones y para diseñar estrategias de manejo sostenible del suelo

5. Objetivos

5.1. Objetivo general:

Analizar la relación entre propiedades físicas del suelo y rendimiento de forrajes en sistemas lecheros familiares de Pujilí.

5.2. Objetivos específicos:

- Caracterizar los parámetros físicos del suelo en los sistemas de producción lechero familiar.
- Caracterizar la producción de biomasa de forrajes en los sistemas de producción lechero familiar.
- Correlacionar los datos suelo-forraje-producción en los sistemas de producción lechero familiar.

6. Actividades y Sistema de Tareas en Relación a los Objetivos Planteados

Objetivo N°1	Actividad	Resultados de la actividad	Medio de verificación
Caracterizar las propiedades físicas del suelo en los sistemas de producción lechero familiar	Delimitación de áreas de muestreo en potreros destinados a producción forrajera	Área de muestreo definidas y georreferenciadas	Croquis de ubicación y registro fotográfico
	Recolección de muestras de suelo con fines analíticos de propiedades físicas	Muestras de suelo recolectadas correctamente	Fichas de campo y registro de muestreo
	Sistematización y descripción de los resultados obtenidos	Base de datos organizada de propiedades físicas del suelo	Base de datos
Objetivo N°2	Actividad	Resultados de la actividad	Medio de verificación

Caracterizar la producción de biomasa de forrajes en los sistemas de producción lechero familiar.	Identificación de especies forrajeras presentes en los sistemas de estudio	Especies forrajeras registradas por productor	Registro de especies y toma de datos
	Medición de la producción de biomasa forrajera mediante cortes	Datos de producción de materia verde	Registro de peso
	Determinación de materia seca	Valores de materia seca	Resultados de los registros de secado y pesaje
Objetivo N°3	Actividad	Resultados de la actividad	Medio de verificación
Correlacionar los datos suelo-forraje-producción en los sistemas de producción lechero familiar.	Integración de los datos de suelo y producción forrajera	Base de datos unificada suelo y forraje	Base de datos consolidada
	Ampliación de análisis estadístico para establecer relaciones entre variables	Coefficientes y valores estadísticos obtenidos	Resultados estadísticos

7. Fundamentación Científica Técnica

7.1. El Suelo Como Recurso Productivo En Sistemas Agropecuarios

La conservación del suelo constituye un factor fundamental para asegurar niveles adecuados de rendimiento y calidad en las producciones agrícolas, tanto destinadas a la alimentación humana como animal. Cuando el suelo presenta deficiencias nutricionales, se ve comprometida la disponibilidad de nutrientes esenciales, lo que repercute negativamente en el crecimiento y la productividad de las plantas (Carranza, 2024).

Dentro del sector agrícola, la erosión del suelo se reconoce como uno de los principales problemas ambientales a escala global. La expansión intensiva de la agricultura ha favorecido

procesos de degradación física y pérdida de suelo fértil, provocando que una proporción considerable de las tierras agrícolas haya reducido su capacidad productiva. Esta situación tiene riesgos productivos a la disponibilidad futura en alimentos, lo que evidencia la necesidad de adoptar prácticas agrícolas que permitan conservar y mejorar la calidad del suelo (Carranza, 2024).

La agricultura, entendida como la actividad orientada al cultivo de plantas y la cría de animales para la obtención de alimentos y materias primas, cumple una función clave en el progreso socioeconómico (Carranza, 2024).

Diversos estudios señalan que las prácticas agroecológicas no solo contribuyen a la conservación del suelo, sino que también generan múltiples servicios ecosistémicos. El uso de cubiertas vegetales, la aplicación de estiércol y otras enmiendas orgánicas han demostrado efectos positivos sobre propiedades del suelo como el contenido de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana. Asimismo, estrategias como la rotación de cultivos, la labranza de conservación y los sistemas agroforestales han evidenciado su efectividad para mejorar la salud y productividad del suelo cuando se aplican de acuerdo con las condiciones locales (Carranza, 2024).

7.2. Importancia del Suelo en la Producción Agrícola Y Pecuaria

El suelo es la base del crecimiento de los cultivos forrajeros y un componente clave en los sistemas de producción lechera, ya que proporciona soporte, agua, aire y nutrientes. Su calidad depende de la interacción entre las fracciones sólida, líquida y gaseosa, así como de un adecuado equilibrio físico y químico (Marin, 2024).

Un suelo bien estructurado, con pH adecuado y buena fertilidad, permite obtener forrajes de mayor calidad y mejores rendimientos productivos. Por el contrario, el uso intensivo y la repetición de cultivos pueden provocar fatiga del suelo y reducción de la productividad (Marin, 2024).

Prácticas como el encalado y la aplicación de estiércol ayudan a mejorar su fertilidad y actividad biológica del suelo, favoreciendo su sostenibilidad de la producción forrajera y lechera (Marin, 2024).

7.3. Características de los Sistemas Lecheros Familiares

Los sistemas lecheros familiares en el Ecuador se caracterizan por su fuerte vinculación con la agricultura campesina, especialmente en la zona Sierra, donde constituyen una de las principales fuentes de ingreso y sustento rural. Estos sistemas presentan una estructura

productiva diversa, determinada por factores socioeconómicos, ambientales y tecnológicos (Requel, 2015).

Una de las principales características es el uso predominante de mano de obra familiar, lo que reduce los costos de producción y fortalece la organización doméstica del sistema productivo. La participación directa de los miembros del hogar en actividades como ordeño, alimentación del ganado y manejo de potreros es una constante en este tipo de explotaciones (Guevara, 2020).

En términos de tamaño, los sistemas lecheros familiares suelen desarrollarse en pequeñas y medianas unidades productivas, generalmente menores a 10 hectáreas, con un número reducido de animales. La superficie agrícola se destina principalmente a pasturas naturales o cultivadas, combinadas en algunos casos con cultivos agrícolas para autoconsumo (Fierro, 2020).

El manejo alimenticio del ganado se basa mayoritariamente en el pastoreo directo, con un uso limitado de suplementos concentrados o forrajes conservados. La alimentación depende en gran medida de la disponibilidad de pastos y de las condiciones climáticas locales, lo que genera variabilidad en los niveles de producción (Fierro, 2020).

7.4. Importancia Socioeconómica de la Producción Lechera

7.4.1. Familiar en Zonas Rurales

La producción lechera a pequeña escala juega un papel clave ya que genera no solo ingresos por la venta de leche, sino también productos lácteos para consumo familiar, lo que contribuye a reducir la vulnerabilidad alimentaria. Además, estos ingresos permiten a las familias diversificar su consumo alimentario y acceder a servicios básicos como educación y salud, mejorando así la calidad de vida en zonas rurales (Chiuma, 2021).

En contextos ecuatorianos, *la ganadería lechera familiar representa una actividad rentable incluso con bajos precios de leche*, siendo muchas veces la principal fuente de ingresos para los hogares rurales. En algunas comunidades, gran parte de la leche se vende a centros de acopio o se destina a la producción artesanal de lácteos, favoreciendo cadenas productivas locales y contribuyendo a la economía circular de estas zonas (Andrade, 2023).

Finalmente, diversos estudios han identificado que la obtención de leche en lugares rurales influye positivamente en el bienestar social de las comunidades, ya que fomenta la permanencia de las familias en el campo, el mantenimiento de tradiciones productivas y la

cohesión comunitaria, aspectos que son esenciales para el desarrollo sostenible rural (Andrade, 2023).

7.5. Concepto e Importancia de las Propiedades Físicas del Suelo

Las propiedades físicas del suelo se refieren a las características del suelo que determinan su capacidad para transportar y almacenar agua, aire y calor, así como su aptitud para sostener el crecimiento radicular y facilitar procesos biológicos. Estas propiedades incluyen elementos como textura, estructura, porosidad, densidad aparente y capacidad de retención de agua, que se interrelacionan para definir el comportamiento del suelo frente a factores ambientales y productivos (Pritom, 2024).

La evaluación de los parámetros físico del suelo es fundamental porque condiciona directamente la circulación de agua, la aireación y la penetración de raíces, aspectos esenciales para la productividad agrícola. Su estudio permite comprender cómo el suelo puede responder a prácticas de manejo, influir en la disponibilidad de agua para las plantas y determinar las condiciones óptimas para la germinación, crecimiento y desarrollo de los cultivos (Urriola, 2020).

Finalmente, la evaluación de las propiedades físicas del suelo es indispensable para realizar diagnósticos integrales de la calidad del suelo, orientar las decisiones de manejo y diseñar prácticas de conservación que permitan mantener o mejorar la fertilidad física del suelo a lo largo del tiempo, garantizando la sostenibilidad de la producción agrícola (Pritom, 2024).

7.6. Textura del Suelo

La textura del suelo es una propiedad física intrínseca que se refiere a la proporción relativa de partículas minerales de diferentes tamaños, principalmente arena, limo y arcilla, en una muestra de suelo. Esta proporción determina la clasificación textural del suelo y se representa comúnmente mediante el triángulo textural, que ayuda a identificar las clases como arena, limo, arcilla o sus mezclas (por ejemplo, franco o franco-arcilloso), permitiendo describir formalmente la textura del suelo (Herrera, 2024).

Figura 1.

Textura del suelo



Nota: Triángulo de textura del suelo Fuente: Tomado de FAO (2015)

La importancia de la textura radica en que controla directamente las funciones físicas del suelo, como la capacidad de retención de agua, la aireación, la permeabilidad y la disponibilidad de nutrientes. Suelos con mayor contenido de arcilla suelen retener más agua y nutrientes, pero presentan drenaje lento y menor aireación, mientras que los suelos arenosos tienen mayor aireación y drenaje (Buestan, 2022).

Además, la textura influye en la capacidad del suelo para resistir procesos de erosión y compactación, así como en su respuesta al manejo agrícola. Por ejemplo, los suelos con texturas más finas (alto contenido de arcilla) tienden a compactarse más fácilmente con el tráfico de maquinaria o ganado, lo que afecta la infiltración de agua y limita el crecimiento radicular, mientras que los suelos de textura gruesa (arenosos) son menos compactos, pero retienen menos humedad (Buestan, 2022).

La textura también tiene un impacto significativo en la retención y distribución del agua dentro del perfil del suelo, lo cual es esencial para la disponibilidad hídrica de los cultivos. Suelos de textura franca o limosa suelen presentar un equilibrio entre retención y drenaje, ofreciendo condiciones más favorables para el crecimiento de las raíces y la productividad agrícola en comparación con suelos excesivamente arenosos o arcillosos (Lisintuña, 2020).

Finalmente, la caracterización textural es un criterio fundamental para el manejo agronómico del suelo y la planificación de prácticas de conservación, ya que permite seleccionar estrategias de manejo del agua y nutrientes, ajustar sistemas de riego y prevenir problemas de salinidad o degradación. La información textural es, por tanto, esencial para diseñar sistemas de producción sostenibles y eficientes (Lisintuña, 2020).

7.7. Densidad Aparente

La densidad aparente es una propiedad física que representa la masa de partículas sólidas del suelo por unidad de volumen total, incluyendo tanto los sólidos como los poros. Esta propiedad está íntimamente relacionada con la estructura y porosidad del suelo, y se expresa normalmente en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3). Una densidad aparente elevada indica

menor espacio poroso y mayor compactación, lo que puede limitar la penetración de raíces y el movimiento del agua y aire en el perfil del suelo (Tapan, 2021).

La densidad aparente es un indicador práctico de la compactación del suelo, ya que valores altos suelen reflejar un exceso de presión mecánica o tráfico sobre la superficie, como puede ocurrir con la maquinaria agrícola o el pisoteo de ganado. La compactación reduce la cantidad de macroporos, afectando negativamente la infiltración de agua y la disponibilidad de oxígeno para las raíces, lo que repercute directamente en la productividad de los cultivos (Tapan, 2021).

Además, la densidad aparente varía según la textura y el contenido de materia orgánica del suelo. Suelos con mayores contenidos de arcilla y materia orgánica tienden a presentar densidades aparentes más bajas debido a su mayor porosidad y estructura agregada, mientras que suelos arenosos suelen tener densidades aparentes más altas. Esto influye en la capacidad del suelo para almacenar agua útil y sostener procesos biológicos o químicos esenciales para la capacidad productiva del suelo (Norton, 2018).

Desde la perspectiva de la gestión, la medición correspondiente a densidad aparente es clave para diseñar prácticas de manejo y conservación del suelo, como la rotación de potreros, el uso de cultivos de cobertura o la incorporación de materia orgánica. Estas prácticas buscan reducir la compactación y mejorar su composición estructural del suelo, lo cual favorece a la entrada de raíces, la actividad biológica al igual que el flujo de agua, contribuyendo a sistemas productivos más sostenibles (Norton, 2018).

Finalmente, la densidad aparente también se utiliza como un indicador de calidad física del suelo en estudios comparativos entre áreas con diferentes usos del suelo o prácticas de manejo. En sistemas donde predomina el pastoreo continuo sin rotación, por ejemplo, se han observado densidades aparentes significativamente mayores que en áreas con manejo adecuado, lo que evidencia una mayor degradación física del suelo (Norton, 2018).

7.8. Porosidad Del Suelo

La porosidad del suelo se define como el porcentaje del volumen total del suelo que está ocupado por espacios vacíos o poros, los cuales pueden contener aire o agua y permiten la circulación de gases, líquidos y la expansión de las raíces. Esta propiedad física está estrechamente relacionada con otras características del suelo, como su estructura, textura y contenido de materia orgánica, y es fundamental para evaluar su calidad física y capacidad productiva (FAO, 2019).

Desde una perspectiva funcional, la porosidad influye directamente en la capacidad del suelo para almacenar y transmitir agua, así como en la aireación del perfil edáfico. La presencia y distribución de poros de diferentes tamaños (macro y microporos) determinan la velocidad con la que el agua se infiltra y se mueve en el suelo, afectando la disponibilidad de humedad para los cultivos y la eficiencia de uso del agua en zonas agrícolas (Ze-We, 2023).

La porosidad también condiciona actividades biológicas esenciales del suelo. La existencia de espacios interconectados permite el intercambio gaseoso necesario para la respiración de microorganismos y raíces, además de facilitar el flujo de nutrientes en solución. Por lo tanto, una porosidad adecuada favorece la actividad biológica del suelo, la estabilidad de agregados y, consecuentemente, la fertilidad física, aspectos determinantes para la productividad y sostenibilidad de los sistemas de cultivo (Ze-We, 2023).

Los manejos agronómicos, como el manejo de coberturas vegetales, rotación, incorporación de carbono orgánico del suelo y prácticas de conservación del suelo, pueden modificar la porosidad. En general, técnicas que aumentan la materia orgánica y reducen la compactación tienden a incrementar la porosidad total, mejorando la capacidad de infiltración de agua, el drenaje y la aireación, elementos claves para el crecimiento radicular y el rendimiento de los cultivos (Ze-We, 2023).

Finalmente, la porosidad del suelo es un indicador esencial en evaluaciones de calidad física del suelo, puesto que permite comparar cómo diferentes usos y prácticas de manejo influyen en la estructura física. Su medición es útil para diseñar planes de manejo del agua, sistemas de riego y estrategias de conservación que promuevan la productividad y la sostenibilidad en sistemas agrícolas y ganaderos (Ze-We, 2023).

7.9. Infiltración y Retención de Humedad

La infiltración del agua en el suelo es el proceso mediante el cual el agua se mueve desde la superficie hacia el interior del perfil edáfico. Este proceso está influenciado por factores como la textura, estructura y la humedad inicial del suelo, lo que determina la capacidad con que el agua de lluvia o riego penetra y se distribuye. La infiltración es fundamental porque reduce el escurrimiento superficial y permite que el agua se almacene en el suelo para su uso por las plantas; además, su tasa máxima se denomina capacidad de infiltración, que disminuye a medida que la humedad del suelo aumenta (Carnero, 2018).

La retención de humedad en el suelo está relacionada con su habilidad para almacenar agua después de un evento de infiltración. El agua que no se drena por gravedad queda

disponible en los poros del suelo y es esencial para mantener la humedad útil que las plantas pueden utilizar. Esta retención depende de la curva de retención de agua del suelo (SWRC), que describe cómo el contenido de agua cambia con la tensión de succión y está influenciada por propiedades físicas como la porosidad y la distribución del tamaño de partículas (Carnero, 2018).

Los estudios recientes han demostrado que la conformación física del suelo, además de su contenido en materia orgánica afectan tanto la infiltración como la retención de humedad. Suelos con mayor materia orgánica y agregados estables tienden a poseer macroporos que facilitan la entrada de agua y microporos que aumentan la retención de humedad, mejorando el equilibrio entre el agua almacenada y la disponible para las plantas, lo cual es clave para la productividad y la sostenibilidad agrícola (Yangong, 2023).

La variabilidad de la humedad del suelo debido a prácticas de manejo y condiciones ambientales también se refleja en la infiltración y la retención de agua. Por ejemplo, la presencia de vegetación y coberturas protectoras reduce la escorrentía y favorece una mayor infiltración inicial; asimismo, una mayor vegetación contribuye a mejorar la estructura del suelo y su capacidad para conservar humedad, lo que significa una mayor disponibilidad hídrica en periodos secos (Yangong, 2023).

Entender cómo interactúan la infiltración y la retención de humedad es fundamental para diseñar estrategias de manejo de tierras que optimicen la disponibilidad de agua en el perfil del suelo, reduzcan el impacto de la erosión y aumenten la eficiencia de uso del agua en sistemas agrícolas y ganaderos. Esta comprensión favorece la planificación de prácticas sostenibles como la agricultura de conservación y la implementación de coberturas vegetales, que permiten a los suelos funcionar mejor como reservorios de agua (Yangong, 2023).

7.10. Compactación del Suelo por Pisoteo Animal

La compactación del suelo por pisoteo animal se refiere al proceso mediante el cual la presión ejercida por las pezuñas de los animales al caminar sobre el suelo reduce el espacio poroso, incrementa su densidad aparente y altera significativamente la estructura física del perfil superficial. Este fenómeno es especialmente evidente en zonas de pastoreo intensivo y puede limitar la infiltración de agua, disminuir la aireación del suelo y restringir la penetración radicular, afectando la productividad y salud general del suelo. Estudios recientes han desarrollado modelos que estiman cómo el movimiento de ganado modifica propiedades como

la densidad aparente y la macroporosidad, y cómo estas alteraciones influyen en funciones críticas del suelo, como la conductividad hidráulica saturada (Cardenas, 2023).

Investigaciones concretas sobre el efecto del pisoteo del ganado han demostrado que el impacto físico de las pezuñas sobre la superficie causa un colapso parcial de los poros grandes, aumentando la resistencia a la penetración y favoreciendo la compactación del suelo. En pastizales de sistemas silvopastoriles y áreas ganaderas, este efecto tiende a concentrarse en las capas más superficiales del suelo (generalmente en los primeros 10 cm) y puede variar según la intensidad de pastoreo, el contenido de humedad del suelo y las características texturales del mismo (Cardenas, 2023).

El pisoteo animal no solo comprime físicamente el suelo, sino que también puede reducir la vegetación y la cobertura vegetal, incrementando la exposición del suelo a otros factores de degradación. La mayor presión ejercida por el peso de animales como bovinos en comparación con animales más ligeros intensifica estos efectos. Por ejemplo, la estructura del suelo puede perder gradualmente poros grandes necesarios para el flujo de agua y aire, lo que contribuye a un aumento de la escorrentía superficial y potencial erosión bajo condiciones de lluvia (Baptista, 2023).

7.11. Concepto de Biomasa Forrajera

La biomasa forrajera se define como la cantidad de materia vegetal principalmente hojas y tallos disponible en un pastizal o cultivo forrajero que puede ser consumida por los animales. Esta materia es un eje central del sistema de alimentación de los rumiantes, lo cual proporciona la energía y los nutrientes necesarios para mantener las funciones fisiológicas y productivas del ganado. La producción y acumulación de esta biomasa es un indicador clave de la productividad y sustentabilidad de los sistemas ganaderos, y su estimación precisa es fundamental para una gestión eficiente de los recursos forrajeros. Estudios como los realizados en pasturas del valle cálido del Magdalena demuestran la importancia de medir y cuantificar esta biomasa bajo diferentes condiciones de manejo y densidades de cobertura arbórea para mejorar la producción animal sostenible (Delgado, 2015)

La producción de biomasa forrajera está influenciada por factores agronómicos como la altura de corte y la edad de las plantas al momento de la cosecha, lo que a su vez afecta tanto la cantidad total de forraje como su calidad nutricional. Por ejemplo, investigaciones que comparan diferentes alturas de corte en especies forrajeras han demostrado que estos manejos influyen en la relación entre biomasa producida y su composición estructural (como hojas frente

a tallos) y, por ende, en el valor nutritivo del forraje para la alimentación animal. Estos estudios permiten establecer prácticas de manejo óptimas que maximizan la producción de biomasa útil dentro de los sistemas de producción lechera o de carne (Salazar, 2018).

La biomasa forrajera también tiene un componente ecológico importante, puesto que su cantidad y calidad determinan la capacidad de soporte del ecosistema para la producción animal, así como la sostenibilidad del uso del suelo. La disponibilidad estable de biomasa en pastizales bien manejados contribuye a reducir la presión sobre recursos vegetales, puede mejorar la estructura del suelo y favorecer prácticas de manejo que promuevan una ganadería más sostenible (Salazar, 2018).

La biomasa forrajera se define como la cantidad de materia vegetal principalmente hojas y tallos disponible en un pastizal o cultivo forrajero que puede ser consumida por los animales. Esta materia actúa como soporte de sistemas de alimentación en los rumiantes, lo cual proporciona la energía y los nutrientes necesarios para mantener las funciones fisiológicas y productivas del ganado. La producción y acumulación de esta biomasa es un indicador clave de la productividad y sustentabilidad de los sistemas ganaderos, y su estimación precisa es fundamental para una gestión eficiente de los recursos forrajeros. Estudios como los realizados en pasturas del valle cálido del Magdalena demuestran la importancia de medir y cuantificar esta biomasa bajo diferentes condiciones de manejo y densidades de cobertura arbórea para mejorar la producción animal sostenible. (Salazar, 2018)

La biomasa generada en estos sistemas no solo cumple una función nutricional, sino que también representa un indicador de sostenibilidad, ya que su manejo adecuado permite conservar el nivel de nutrientes del suelo, reducir procesos erosivos y mejorar su eficiencia en la conversión alimenticia del ganado. En este contexto, el desarrollo de estrategias climáticamente inteligentes para la producción de biomasa forrajera se vuelve fundamental para enfrentar los desafíos del cambio climático y garantizar la seguridad alimentaria en zonas rurales (Soria, 2014).

Tabla 1.

Participación del ganado bovino según disponibilidad de biomasa forrajera en Ecuador

Región	% del hato bovino nacional	Superficie de pastos (ha)	Biomasa estimada (ton/ha/año)
Sierra	53 %	1.650.000	6,5 – 8,0

Costa	38 %	1.100.000	5,0 – 6,5
Amazonia	9%	350.000	3,5 – 5,0

Nota: Participación de Ganado Bovino Fuente: Tomado (Soria, 2014).

7.12. Materia Verde y Materia Seca

La materia verde se refiere a la cantidad total de forraje o biomasa vegetal fresca producida en una pastura o cultivo forrajero, incluyendo todas sus partes (hojas, tallos y otros tejidos) en el estado natural con su contenido de agua. Esta medida es importante para estimar la oferta diaria de forraje disponible para animales en pastoreo y planificar la carga animal en potreros, aunque no resume directamente la calidad nutricional porque incluye agua que no aporta nutrientes. Estudios de producción de pastos han utilizado la materia verde como indicador de la cantidad bruta de forraje producido antes de evaluaciones más precisas de su valor alimenticio (Sanchez, 2023).

La materia seca (MS) representa la fracción de la planta que queda luego de eliminar el agua presente en la muestra forrajera mediante procesos de desecación en laboratorio. En la materia seca se concentran los nutrientes esenciales como proteínas, carbohidratos, fibras y minerales que realmente pueden ser aprovechados por los animales para producir leche, carne o realizar funciones fisiológicas. Por ello, la MS es un criterio fundamental en la formulación de dietas y la evaluación de la calidad nutricional de los forrajes, ya que permite comparar la verdadera disponibilidad de nutrientes independientemente de la humedad de la planta. (Sanchez, 2023)

La relación entre materia verde y materia seca es clave para entender la calidad y cantidad de alimento disponible en sistemas ganaderos. Si bien la materia verde muestra el volumen total de forraje, la materia seca indica la proporción de ese forraje que realmente aporta nutrientes. En estudios de producción de pasto Saboya (*Megathyrus maximus*), por ejemplo, se ha observado que diversos factores como la fertilización orgánica pueden influir en el porcentaje de materia seca sin necesariamente cambiar la materia verde total, lo que repercute en la digestibilidad y valor nutritivo del forraje para el ganado (Vera, 2024).

La medición de la materia seca es especialmente útil porque todos los requerimientos nutricionales de los animales se expresan en base seca; es decir, los aportes de energía, proteína, fibra y otros nutrientes se calculan sobre la materia seca del alimento, no sobre su peso fresco. Esto permite formular raciones balanceadas y eficientes para diferentes categorías de ganado y optimizar la producción animal en sistemas lecheros y de carne (Silva, 2021).

En contextos de investigación agrícola y ganadera, tanto la materia verde como la materia seca son parámetros que permiten evaluar la eficiencia de manejo de pasturas y forrajes, estimar la disponibilidad de alimento por unidad de superficie y calcular indicadores productivos como el rendimiento de forraje por hectárea o la cantidad de forraje disponible por animal. De esta forma, estos conceptos no solo son útiles para describir la oferta forrajera, sino también para desarrollar estrategias de alimentación más sostenibles y productivas (Silva, 2021).

8. Hipótesis

Ha: En los sistemas de producción lechera familiar del cantón Pujilí, las propiedades físicas del suelo como textura, densidad aparente, porosidad y capacidad de retención de agua, presentan una relación significativa con el rendimiento forrajero.

Ho: En los sistemas de producción lechera familiar del cantón Pujilí, las propiedades físicas del suelo como textura, densidad aparente, porosidad y capacidad de retención de agua, no presentan una relación significativa con el rendimiento forrajero.

9. Metodología del Proceso de Investigación Según Enfoque

Se realizará visitas mensuales a cada uno de los predios de los productores familiares vinculados al programa UTCgen en el cantón Pujilí. En estas visitas se realizará análisis in situ de las propiedades físicas del suelo, biomasa vegetal y producción de leche.

9.1. Propiedades físicas del suelo

9.1.1. Textura del Suelo

Método:

Materiales: Pala, recipiente con agua, limones, bicarbonato, vaso de precipitación.

Pasos:

1. Toma un vaso de precipitación de 600 ml de capacidad y llena con muestra de tierra hasta 300 ml.
2. Coloca 300 ml de agua (H₂O).
3. Coloca 25 ml de ácido cítrico y mezclamos.
4. Agrega 5 g de hidrogenocarbonato de sodio (NaHCO₃) y mezclamos.
5. Déjalo reposar 2 horas para poder observar.

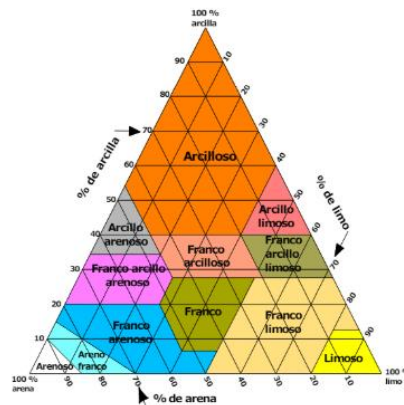
Interpretación.

Una vez pasado el tiempo de reposo el total del suelo llega a equivaler el 100%, hay que observar guiándonos en las medidas en ml del vaso de precipitación, por ejemplo si el total del

suelo es de 400 ml y la cantidad de arena es de 100 ml el porcentaje de arena representa al 25% de arena, de 100 a 350 ml representa al limo que equivale al 63% y el restante que es de 350 a 400 ml representa a arcilla en un 12%, una obtenido estos datos nos guiamos en el triángulo estructuras de United States Department of Agriculture (USDA) y obtenemos que textura tiene nuestro suelo.

Figura 2.

Determinación de la estructura del suelo



Nota: La figura muestra la determinación de la estructura del suelo.

9.1.2. Densidad Aparente

Método: "Del hoyo de volumen conocido"

Materiales: Cuchara, regla, bolsa plástica, balanza (puede ser de cocina).

Pasos:

1. Excava un hoyo (10x10x10 cm = 1000 cm³) y guarda TODO el suelo extraído en una bolsa.
2. Seca el suelo al sol por 2 días y pésalo (ej. 1300 g).
3. Calcula:

$$\text{Densidad aparente (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Peso seco (g)}}{\text{Volumen (cm}^3\text{)}} \quad \text{Densidad aparente (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Peso seco (g)}}{\text{Volumen (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Ejemplo: } \frac{1300}{1000} = 1.3 \text{ g/cm}^3 \quad \frac{1000}{1300} = 1.3 \text{ g/cm}^3.$$

Interpretación:

- **>1.6 g/cm³:** Muy compactado (raíces no crecen bien).
- **1.2–1.4 g/cm³:** Ideal para pastos.

9.1.3. *Infiltración de agua*

Método: "Del vaso o lata", tres por hectárea.

Materiales: Lata de conserva (sin tapa y sin fondo), agua, cronómetro (celular).

Pasos:

1. Clava la lata 5 cm en el suelo
2. Vierte 500 ml de agua y mide el tiempo que tarda en absorberse.

Interpretación:

- Suelos con infiltración lenta requieren drenaje o cultivos tolerantes a encharcamiento.

9.1.4. *Porosidad*

Método: "De la esponja"

Materiales: Muestra de suelo, recipiente con agua.

Pasos:

1. Toma un terrón seco de suelo 100 gramos y sumérgelo en agua por 1 minuto.
2. Sácalo y observa: se contará las burbujas

9.1.5. *Biomasa*

Pasos:

1. **Selecciona un área representativa** del potrero (evita bordes y zonas con sombra/agua). Seis muestras al azar por hectárea
2. **Marca un cuadrante de 0,50 m²** (0,50m × 0,50m) usando la cuerda.
3. **Corta todo el forraje dentro del cuadrante a ras de suelo.**
4. **Pesa el forraje fresco** (en kg) y registra:
 - **Peso húmedo total:** Ejemplo: 2.5 kg/m².
 - **Si es posible, seca una submuestra al sol** (3 días) para estimar materia seca (MS).

Cálculo:

- **Biomasa (kg MS/m²)** = Peso fresco × % MS (ej. si 20% MS → 2.5 kg × 0.20 = 0.5 kg MS/m²).
- **Producción por hectárea** = Biomasa × 10,000 (ej. 0.5 kg/m² × 10,000 = 5,000 kg MS/ha).

9.2. Interpretación de Resultados:

9.2.1. *Diseño del estudio*

- **Tipo de investigación:** Cuantitativa, correlacional y explicativa.

- **Enfoque:** Mecanicista-empírico adaptado al contexto agropecuario.
- **Unidad de análisis:** Parcelas productoras de leche con pasturas establecidas.

9.2.2. Selección de zonas de estudio

- Comunidades representativas del cantón Latacunga: Aláquez, Mulaló, Joseguango Bajo.
- Criterios: Altitud, tipo de suelo, sistema de manejo, acceso al agua.

9.2.3. Caracterización de las propiedades físicas del suelo

- **Textura:** Método del hidrómetro.
- **Densidad aparente:** Método del cilindro.
- **Infiltración:** Método del doble anillo.
- **Temperatura y humedad:** Sensores digitales en campo.
- **Profundidad efectiva:** Medición directa con barreno.

9.2.4. Evaluación de la producción de forraje

- **Biomasa aérea:** Corte en cuadrantes de 0,50 m².
- **Frecuencia de corte:** Cada hectárea se debe tomar 6 muestra de forraje seleccionadas al azar.
- **Especies predominantes:** Ryegrass, trébol, kikuyo.
- **Contenido de materia seca:** Secado en estufa a 65 °C.

9.2.5. Análisis estadístico

- **Estadística descriptiva:** Se representará mediante gráficos y tablas las medidas de tendencia central y variabilidad de cada uno de los factores cuantitativos.
- **Correlación de Pearson:** Para evaluar la relación entre variables cuantitativas físicas del suelo y producción de forraje.
- **Análisis de Componentes Principales:** Se realizará este análisis para reducir la dimensionalidad de los datos y encontrar patrones ocultos entre las variables físicas del suelo, la biomasa y la producción de leche.

Diseño Factorial. Se evaluará el efecto combinado de múltiples factores cuantitativos y cualitativos en la variable de respuesta producción de leche. Se considerará los factores físicos del suelo, la biomasa del forraje, con la producción de leche.

El análisis estadístico se realizará con el software R (versión 4.3.1; R Core Team, 2023), utilizando los paquetes.

10. Resultados

Los sistemas ganaderos del cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi, se establecen mediante condiciones edafoclimáticas del suelo andino, el cual se caracteriza por temperaturas entre 10 y 14 °C y precipitaciones variables entre 700 y 1200 mm anuales. Estos ecosistemas presentan suelos de origen volcánico con una alta fertilidad natural pero elevada susceptibilidad a procesos de compactación y degradación física debido al manejo ganadero intensivo y al pisoteo animal.

En la presente investigación se realizó una evaluación de variables físicas (densidad aparente, infiltración de agua, porosidad) y de biomasa, biomasa por hectárea del suelo para determinar su influencia en el rendimiento forrajero.

Tabla 2.

Caracterización estadística descriptiva de propiedades físicas y biomasa del suelo.

Variable de estudio	Nro	n	media	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	Valor skew	Valor Kurtosis
Densidad aparente	1	39	1.04	0.08	0.9	1.19	-0.11	-1.00
Infiltración agua	2	39	21.31	2.75	16.0	29.0	0.16	0.07
Porosidad	3	39	22.88	3.03	18.0	28.0	0.08	-1.29
Biomasa	4	39	0.22	0.07	0.1	0.30	-0.22	-0.82
Biomasa hectárea	5	39	2225.2	575.55	1181.1	3321.10	0.011	-0.92

Nota: Estadística Descriptiva de Propiedades Físicas del Suelo.

En la Tabla 2 se encuentra la evaluación de estadística descriptiva de cinco variables relacionadas a las propiedades físicas y biomasa de 39 muestras de suelo. En relación a las variables físicas, se establece que la densidad aparente presentó una media de $1,04 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$,

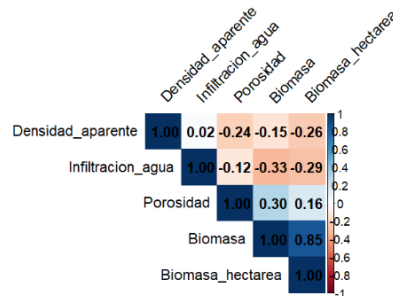
con un rango entre 0,90 y 1,19 g/cm³, evidenciando baja variabilidad y condiciones favorables de estructura del suelo.

La infiltración de agua mostró una media de $21,31 \pm 2,75$ mm/h, indicando una capacidad moderada de entrada de agua al perfil. La porosidad alcanzó un valor promedio de $22,88 \pm 3,03$ %, lo que sugiere adecuada aireación del suelo; la cual es considerada moderada para suelos activos, valores de infiltración más bajos se han asociado con estructuras de suelos degradadas o compactados, en cambio suelos de uso intensivo donde la infiltración puede variar por debajo de 13mm en superficies degradadas. Por otro lado, las variables de: biomasa presentó una media de $0,22 \pm 0,07$ kg, mientras que la biomasa por hectárea registró $2225,24 \pm 575,55$ kg/ha, reflejando una biomasa moderada.

Cabe resaltar que las distribuciones de las variables mostraron asimetrías leves (skew entre -0,22 y 0,16) y valores de Kurtosis negativos, indicando que los datos obtenidos son relativamente dispersos y sin presencia de valores extremos lo cual permite un análisis estable y confiable. De igual forma, los datos obtenidos por los productores no indican una diferencia significativa entre productores (valor p entre 0.337 y 0.988).

Figura 3.

Relación estadística entre indicadores físicos y biomasa del suelo



Nota: La figura muestra la relación entre indicadores físicos y biomasa de suelo.

En la Figura 3 se indica la matriz de correlación en donde se evidencia principalmente las relaciones existentes entre las variables de estudio: físicas y biomasa del suelo para comprender su comportamiento. El mapa de calor que se utilizó fue mediante una escala cromática divergente, en donde los tonos azules indican correlaciones positivas y se establece que entre más oscuro sea el color entonces existe una relación positiva fuerte; por otro lado, los tonos rojos corresponden a correlaciones negativas y se establece que entre más oscuro sea el color existe una relación inversa predominante.

En las variables físicas evaluadas se establece que la densidad aparente mostró una correlación nula con la infiltración del agua ($r = 0,02$) lo que indica que, en el sistema evaluado, la compactación del suelo no ejerce una influencia directa sobre la capacidad de infiltración, sugiriendo que otros parámetros como la textura, la estructura del suelo o la cantidad de materia orgánica podrían estar regulando este proceso. También, se observó una correlación negativa entre densidad aparente y porosidad ($r = -0,24$), en donde la compactación tiende a reducir los espacios porosos del suelo y esto afecta directamente a la aireación y el movimiento del agua. Además, la densidad aparente presentó una relación negativa con la biomasa ($r = -0,15$) y con la biomasa por hectárea ($r = -0,26$), lo que indica que los suelos más compactos no promueven un desarrollo biótico adecuado. En cuanto a la infiltración de agua, se indica una correlación negativa con la porosidad ($r = -0,12$), la biomasa ($r = -0,33$) y la biomasa por hectárea ($r = -0,29$), lo que indica que un incremento en la infiltración no necesariamente está asociado a mayores niveles de biomasa.

Por otro lado, la porosidad presentó una correlación positiva con la biomasa ($r = 0,30$) y con la biomasa por hectárea ($r = 0,16$), lo que demuestra que suelos con mayor espacio poroso favorecen la aireación, la retención de humedad y, por ende, el desarrollo de biomasa. De igual forma, se demuestra una correlación positiva entre biomasa y biomasa por hectárea ($r = 0,85$), lo que sugiere una relación directa y consistente que, a mayor biomasa presente en el suelo, mayor es su acumulación a escala hectárea.

Debido a la naturaleza de los datos y superficies evaluadas se realizó un análisis en función del Productor 3 ya que contiene dos terrenos a partir de los cuales se indican en la Tabla 3 y Tabla 4 con el fin de establecer una diferencia significativa entre las variables y los terrenos.

Tabla 3.

Análisis inferencial de variables del suelo en el Productor 3

Variable de estudio	Media terreno 1	Media terreno 2	Estadístico t	Valor p
Densidad aparente	1.04	1.01	0.426	0.696
Infiltración agua	22.33	20.33	1.342	0.257
Porosidad	22.67	24.67	-0.802	0.472
Biomasa	0.267	0.2	2	0.184
Biomasa hectárea	2798.5	2058.13	1.487	0.226

Nota: Análisis Inferencial de Variables del Suelo.

En base a la Tabla 3 se indica que no existe diferencia significativa entre el Terreno 1 y Terreno 2 del Productor 3 en función de las variables de densidad aparente, infiltración de agua, porosidad, biomasa y biomasa por hectárea ya que el valor p es mayor a 0.05.

Tabla 4.

Relación estadística entre indicadores físicos y biomasa del suelo del Productor 3

Variable de estudio	Densidad aparente	Infiltración agua	Porosidad	Biomasa	Biomasa hectárea
Densidad aparente	1.000	-0.143	-0.159	-0.201	-0.487
Infiltración agua	-0.143	1.000	0.507	0.066	0.282
Porosidad	-0.159	0.507	1.000	-0.702	-0.454
Biomasa	-0.201	0.066	-0.702	1.000	0.905
Biomasa hectárea	-0.487	0.282	-0.454	0.905	1.000

Nota: Relación Estadística Entre Indicadores Físicos y Biomasa del Suelo.

En la Tabla 4 se indica la matriz de correlación del Productor 3 en donde se evidencia que la densidad aparente mantiene una relación negativa con la infiltración ($r = -0,143$), la porosidad ($r = -0,159$), la biomasa ($r = -0,201$) y la biomasa por hectárea ($r = -0,487$). La infiltración de agua presenta una correlación positiva con la porosidad ($r = 0,507$) y relaciones débiles con la biomasa ($r = 0,066$) y la biomasa por hectárea ($r = 0,282$). La porosidad se asocia de manera negativa con la biomasa ($r = -0,702$) y con la biomasa por hectárea ($r = -0,454$). Sin embargo, existe una correlación positiva entre biomasa y biomasa por hectárea ($r = 0,905$), siendo la relación más alta observada. Esto concuerda con la información establecida en la Tabla 2.

Tabla 5.

Análisis de componente principales

Indicador	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5
Desviación estándar	1.4951	1.0328	0.9158	0.8577	0.35178

Proporción de varianza	0.4471	0.2133	0.1677	0.1471	0.02475
Proporción acumulada	0.4471	0.6604	0.8281	0.9752	1.00000

Nota: Análisis de componente principales.

En la Tabla 5 se indica que los componentes PC 1, PC 2 y PC3 explican más del 60% del sistema de propiedades físicas y biomasa del suelo; siendo así componentes muy sólidos que explican la variabilidad del suelo y la biomasa. Es importante definir que el componente PC 1 representa el eje productivo, PC 2 representa el eje físico del suelo y PC 3 representa el eje hídrico/estructural; lo cual es de utilidad para definir las cargas de los componentes establecidos, los cuales se indican en la Tabla 6.

Tabla 6.

Cargas definidas por cada componente principal

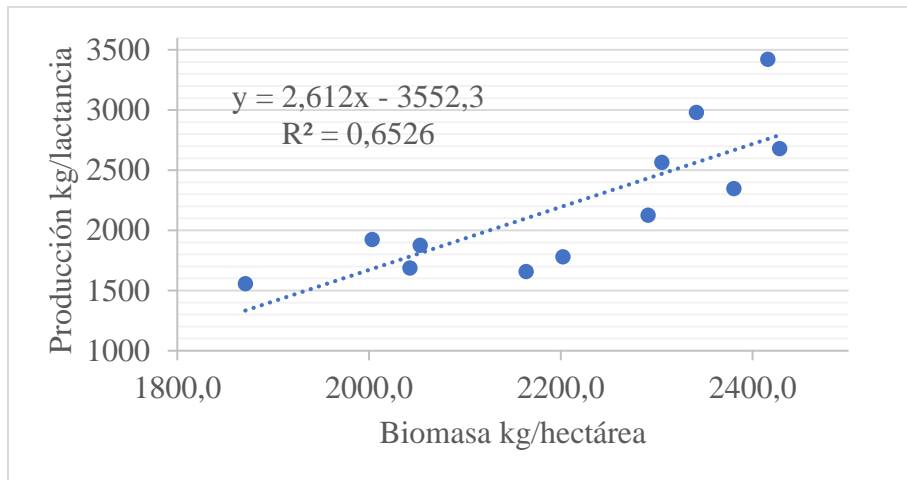
Variable	PC1	PC2	PC3
Densidad aparente	0.2633249	-0.7009119	0.2527802
Infiltración agua	0.3372719	0.4112303	-0.6069115
Porosidad	-0.3089589	0.5280981	0.6289942
Biomasa	-0.6063045	-0.1845330	-0.1830739
Biomasa hectárea	-0.5948504	-0.1633159	-0.3723048

Nota: Cargas Definidas por cada Componente Principal.

Las cargas definidas en el PC 1 indica que está dominado por la biomasa ya que los valores independientemente del signo negativo, representan el mayor peso del componente. Por otro lado, en el PC 2 se indica el estado estructural del suelo está definido por una relación de alta densidad aparente conlleva a un estado físico del suelo bajo, mientras que una alta porosidad se relaciona con un estado físico del suelo alto. Finalmente, el PC 3 establece un equilibrio entre la retención y drenaje del suelo siendo así que los factores de porosidad e infiltración de agua representan un balance ideal que se debe considerar en aplicaciones prácticas.

Figura 4.

Relación entre biomasa forrajera (kg/ha) y producción de leche (kg/lactancia)



Nota: La figura muestra una relación entre biomasa y producción de leche.

La Figura 4 evidencia una relación lineal positiva entre la biomasa forrajera (kg/ha) y la producción de leche (kg/lactancia), lo cual refleja que, en las condiciones evaluadas, una mayor disponibilidad de forraje se asocia con mayores niveles de producción por lactancia. El modelo de regresión obtenido ($y = 2,612x - 3552,3$) sugiere que el incremento de la biomasa tiene un efecto directo sobre la respuesta productiva: por cada unidad adicional de biomasa por hectárea, la producción tiende a aumentar en promedio 2,612 kg por lactancia, dentro del rango de observaciones del estudio.

Además, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,6526$) muestra que aproximadamente el 65% de la variabilidad de la producción por lactancia puede explicarse por la variación en la biomasa/ha, lo que representa una asociación de magnitud moderada a alta y refuerza el papel de la oferta forrajera como factor clave del desempeño productivo. Sin embargo, la dispersión de los puntos alrededor de la recta indica que existe un porcentaje restante de variación atribuible a otros factores no incluidos en el modelo; como, por ejemplo: manejo del pastoreo, calidad nutricional del forraje, condición corporal, etapa de lactancia y sanidad; por lo que la biomasa actúa como un predictor importante pero no único de la producción de leche.

10.1. Discusión

Tabla 7. Caracterización estadística descriptiva de propiedades físicas y biomasa del suelo.

Los resultados de estudio evidencian una densidad aparente promedio de 1.04 g/cm³, el cual es un valor moderado que evidencia la existencia de procesos de compactación superficial asociados al tránsito constante del ganado. En los suelos agrícolas típicos, la densidad aparente

varia ampliamente dependiendo de la textura y manejo con valores reportados entre 0,66 y 1,11 $\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Otros estudios han demostrado que los valores de densidad aparente son mayores a 1,40 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ lo cual afecta seriamente al desarrollo radicular y la infiltración de agua debido a la compactación del suelo. En este contexto, nuestros valores medios se encuentran dentro de rangos que no deberían impedir el crecimiento radicular ni la penetración de agua, lo que demuestra condiciones de manejo moderado y una ausencia de compactación extrema. La correlación negativa observada entre densidad aparente y biomasa forrajera confirma que la compactación limita el crecimiento radicular, la aireación del suelo y la absorción eficiente de agua y nutrientes, afectando directamente la productividad del forraje.

Los datos obtenidos reflejan que la densidad aparente presentó una media de 1.04 g/cm^3 , valor considerado moderado para suelos volcánicos, los cuales normalmente presentan densidades inferiores a 1.0 g/cm^3 debido a su alta porosidad natural (Hamza & Anderson , 2005). Sin embargo, el rango observado (0.9 – 1.19 g/cm^3) evidencia sectores con cierto grado de compactación, lo que concuerda con estudios realizados en pastizales altoandinos donde el pisoteo animal incrementa significativamente la densidad aparente del suelo (Hamza & Anderson , 2005) (Ochoa , et al., 2018).

Los suelos con mejores estructuras muestran tasas más altas, lo que nos ayuda a tener una entrada de agua y disminuye la escorrentía superficial. Sin embargo, se evidenció una correlación negativa moderada con la biomasa, lo que sugiere que tasas excesivamente elevadas de infiltración pueden generar pérdidas de humedad y pérdida de nutrientes, reduciendo su disponibilidad para las plantas. Esta información ha sido reportada por (Ochoa , et al., 2018) quien señala que una infiltración demasiado rápida puede disminuir el tiempo de residencia del agua en la zona radicular afectando la eficiencia en la absorción de nutrientes, especialmente nitrógeno y potasio. Estudios realizados en la provincia de Tungurahua por (Guamán, Córdova, & Vinuesa, 2019) demostraron que suelos con infiltración excesiva presentaron menor biomasa en comparación con aquellos con infiltración moderada.

Los resultados de biomasa son relacionables con sistemas lecheros familiares donde la oferta forrajera se sostiene, pero queda condicionada por el balance entre crecimiento vegetal, disponibilidad de agua y presión de pastoreo, es por ello que el rendimiento no depende únicamente de la cobertura de pasto, sino del funcionamiento físico del suelo que soporta la raíz (FAO, 2019) (Córdova, Vinuesa, & Sánchez, 2020). Además, el tratarse de biomasa obtenida por corte en cuadrantes y extrapolación a hectárea, el resultado integra tanto la densidad del pasto como el estado fenológico y la intensidad de aprovechamiento es por ello

que, cambios en altura de corte, frecuencia de pastoreo y condiciones del suelo pueden modificar de manera importante la biomasa disponible (Soria, 2014) (Salazar, 2018).

Figura 5. Relación estadística entre indicadores físicos y biomasa del suelo

La porosidad, con un promedio de 22.88 %, mostró correlaciones positivas con biomasa ($r = 0.297$) y biomasa por hectárea ($r = 0.164$), lo que refuerza el rol fundamental de la estructura del suelo en la productividad vegetal. Una mayor porosidad favorece la aireación, el desarrollo radicular y la actividad microbológica, aspectos esenciales para la mineralización de nutrientes y la absorción eficiente por las plantas (Córdova, Vinueza, & Sánchez, 2020). De igual forma, los autores (Córdova, Vinueza, & Sánchez, 2020) reportan que en sistemas ganaderos de la Sierra norte del Ecuador indican incrementos de hasta 30 % en la producción de biomasa en suelos con porosidad superior al 25 %, destacando la importancia del manejo de cobertura vegetal y la incorporación de materia orgánica.

Tabla 8. Análisis inferencial de variables del suelo en el Productor 3

Las propiedades físicas y biomasa de los dos terrenos son similares y se puede asumir que están funcionando como unidades comparables dentro del mismo sistema de pastoreo, lo cual suele ocurrir cuando la carga animal, la rotación y las prácticas de manejo de la pastura son homogéneas (Córdova, Vinueza, & Sánchez, 2020). La ausencia de diferencias también es compatible con sistemas donde la compactación superficial existe, pero no alcanza niveles críticos que generen divergencias marcadas entre lotes, especialmente si el suelo conserva parte de su resiliencia estructural (Hamza & Anderson, 2005).

Tabla 9. Relación estadística entre indicadores físicos y biomasa del suelo del Productor 3

El incremento de densidad aparente suele representar compactación, reducción de macroporos y restricciones al movimiento de agua/aire y al crecimiento radicular, lo que repercute en la productividad de las pasturas (FAO, 2019) (Hamza & Anderson, 2005). También, la interacción infiltración y retención es clave ya que las tasas altas de infiltración pueden coexistir con pérdidas por drenaje y lixiviación si la distribución de poros privilegia macroporosidad, disminuyendo el tiempo de residencia del agua disponible para la planta (Carnero, 2018) (FAO, 2019). Por otro lado, la porosidad favorece aireación y mayor biomasa, este signo negativo puede interpretarse como un indicio de que en el Productor 3 el aumento de porosidad se asocia a un tipo de estructura que facilita el drenaje o reduce la humedad, afectando el crecimiento del pasto, esto es compatible con enfoques que distinguen entre porosidad total y distribución de poros en donde el rendimiento vegetal depende del equilibrio entre aireación y almacenamiento de agua (Carnero, 2018) (Ze-We, 2023).

Tabla 10. Análisis de componente principales

Estos datos pueden interpretarse mediante pocos gradientes dominantes, lo cual es típico en sistemas suelo y planta donde múltiples indicadores responden a procesos comunes (FAO, 2019). De manera práctica, el hecho que PC1 concentre casi la mitad de la variación sugiere que el sistema está fuertemente gobernado por un eje principal asociado a la respuesta productiva del forraje y su covariación con el estado físico del suelo, coherente con la idea de que la biomasa integra efectos de estructura, disponibilidad hídrica y manejo del pastoreo (Córdova, Vinueza, & Sánchez, 2020) (Guamán, Córdova, & Vinueza, 2019). Asimismo, la contribución relevante de PC2 y PC3 respalda que, además de la producción, existen ejes secundarios vinculados a condición estructural/compactación y a la dinámica hídrica, procesos determinantes del rendimiento vegetal en sistemas agrícolas y ganaderos (Hamza & Anderson , 2005) (Carnero, 2018). El PCA refuerza que la productividad observada no depende de una sola variable aislada, sino del acoplamiento entre estructura del suelo, funcionamiento hidráulico y presión de uso (FAO, 2019) (Baptista, 2023).

Tabla 11. Cargas definidas por cada componente principal

El análisis de componentes principales (PCA) permitió identificar patrones estructurales en el sistema del suelo y el forraje. El primer componente (PC1), que explicó el 44.7 % de la variabilidad, estuvo dominado por biomasa y biomasa por hectárea, lo que evidencia que la productividad forrajera es el principal factor diferenciador entre los sitios muestreados. Este resultado concuerda con lo reportado por (Lal, 2009), quien señala que la biomasa es un indicador integrador del estado físico, químico y biológico del suelo. El segundo componente (PC2), asociado a densidad aparente y porosidad, representa la condición estructural del suelo. Estos resultados coinciden con estudios realizados por (Hamza & Anderson , 2005) quienes demostraron que la estructura del suelo es un factor determinante en la productividad agrícola y pecuaria. Finalmente, el tercer componente (PC3), dominado por porosidad positiva e infiltración negativa, refleja la capacidad del suelo para retener agua sin presentar problemas de drenaje excesivo. Este equilibrio es fundamental en zonas altoandinas como Pujilí, donde la variabilidad climática afecta directamente la disponibilidad hídrica para los pastos (Ochoa , et al., 2018).

Figura 6. Relación entre biomasa forrajera (kg/ha) y producción de leche (kg/lactancia)

La regresión evidencia una asociación positiva entre la biomasa (kg/ha) y la producción de leche (kg/lactancia) ($R^2 = 0,6526$), lo que sugiere que una mayor disponibilidad de forraje contribuye de manera importante a explicar el desempeño productivo del sistema, en

concordancia con que la biomasa representa la base alimenticia de los rumiantes y un indicador operativo de productividad del pastizal (Salazar, 2018) (Soria, 2014). Sin embargo, la dispersión de los datos confirma que la producción no depende únicamente de la cantidad de pasto, sino también de factores de manejo y calidad del forraje, como la altura de corte y la edad del rebrote, que modifican la proporción hoja y tallo y el valor nutritivo disponible para el animal (Salazar, 2018). Adicionalmente, el comportamiento productivo se entiende mejor al considerar la condición física del suelo: la compactación por pisoteo puede incrementar la densidad aparente y limitar el crecimiento radicular y la absorción de agua y nutrientes, afectando la oferta forrajera y, por extensión, la producción de leche (Hamza & Anderson, 2005) (Ochoa, et al., 2018). De igual forma, una infiltración excesivamente rápida puede reducir el tiempo de residencia del agua en la zona radicular y favorecer pérdidas de humedad y nutrientes, lo que se ha asociado con menores niveles de biomasa en pastizales altoandinos en comparación con suelos de infiltración moderada (Ochoa, et al., 2018) (Guamán, Córdova, & Vinueza, 2019).

11. Conclusión

- Las propiedades físicas del suelo en los sistemas de producción lechera familiar evidenciaron valores moderados de densidad aparente, con una media de $1,04 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$ y un rango de $0,90\text{--}1,19 \text{ g/cm}^3$, lo que sugiere presencia de compactación superficial asociada al pisoteo en sectores puntuales. Esta condición se relaciona con la productividad, ya que en el análisis del Productor 3 la densidad aparente mantuvo una asociación negativa con la biomasa por hectárea ($r = -0,487$). Asimismo, la infiltración presentó una media de $21,31 \pm 2,75 \text{ mm/h}$ ($16\text{--}29 \text{ mm/h}$), lo que indica una capacidad moderada de entrada de agua; sin embargo, su comportamiento debe interpretarse con cautela porque, en ciertos sectores, valores relativamente altos podrían favorecer pérdidas de humedad y lixiviación de nutrientes, reduciendo el agua efectivamente disponible para el crecimiento del forraje.
- La porosidad registró un promedio de $22,88 \pm 3,03\%$ ($18\text{--}28\%$), confirmando la relevancia de la estructura del suelo para sostener procesos de aireación y dinámica hídrica. En términos productivos, la biomasa presentó una media de $0,22 \pm 0,07 \text{ kg}$ ($0,10\text{--}0,30 \text{ kg}$), mientras que la biomasa por hectárea alcanzó $2225,24 \pm 575,55 \text{ kg/ha}$ ($1181,10\text{--}3321,10 \text{ kg/ha}$), reflejando un nivel moderado de rendimiento forrajero con variabilidad atribuible a diferencias locales de

suelo y manejo. El análisis multivariado (PCA) reforzó esta interpretación al mostrar que el sistema se explica principalmente por tres componentes: PC1 = 44,71%, PC2 = 21,33% y PC3 = 16,77%, acumulando 82,81% de la variabilidad; esto evidencia que la productividad (biomasa), seguida de la condición estructural (densidad aparente–porosidad) y el balance hídrico (porosidad–infiltración), actúan de manera conjunta en el desempeño del sistema.

- En función de los resultados, se acepta la hipótesis alternativa, confirmando que las propiedades físicas del suelo influyen en la producción de forrajes en los sistemas lecheros familiares de Pujilí. Esta influencia se respalda no solo por los valores descriptivos obtenidos, sino también por la consistencia del análisis comparativo en el Productor 3 (sin diferencias significativas entre Terreno 1 y Terreno 2 para todas las variables evaluadas, con p entre 0,184 y 0,696), y por la estructura multivariada evidenciada en el PCA, que demuestra que la productividad forrajera está condicionada por la interacción entre estructura del suelo y comportamiento del agua en el perfil. El análisis de regresión evidenció una relación positiva entre la biomasa forrajera (kg/ha) y la producción de leche (kg/lactancia), mostrando que, en el sistema evaluado, una mayor disponibilidad de forraje se asocia con mayores niveles de producción. El ajuste del modelo ($y = 2,612x - 3552,3$) y su coeficiente de determinación ($R^2 = 0,6526$) indican que la biomasa explica aproximadamente el 65% de la variación observada en la producción por lactancia, por lo que constituye un indicador relevante del desempeño productivo.

12. Recomendación

- Implementar sistemas de pastoreo rotacional que permitan reducir el impacto del pisoteo animal y prevenir la compactación del suelo, contribuyendo a la recuperación de su estructura física.
- Se sugiere incorporar materia orgánica mediante el uso de abonos orgánicos, compost y estiércol, para mejorar la porosidad, la estabilidad estructural y la retención hídrica del suelo.
- Se aconseja fortalecer los procesos de capacitación a los productores en técnicas de manejo sostenible del suelo y conservación de pasturas, así como fomentar futuras investigaciones que incluyan variables químicas y biológicas del suelo,

con el propósito de obtener una visión integral de la fertilidad del suelo y la sostenibilidad productiva del sistema.

13. BIBLIOGRAFÍA

Andrade, G. (29 de Julio de 2023). *Impacto socioeconómico de la ganadería lechera en comunidades indígenas del Ecuador*. Obtenido de Universidad De Guayaquil: <https://repositorio.ug.edu.ec/items/f8de47eb-9f83-4e1a-9a46-5d0d66aedc63>

Baptista, E. (12 de Enero de 2023). *Detección y mapeo de los efectos del pisoteo de vacas en la compactación del suelo del ecosistema mediterráneo de Montado*. Obtenido de NIH: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9862033>

Bravo, F. (20 de Febrero de 2023). *PLAN DE SALVAGUARDA DE LAS BEBIDAS TRADICIONALES DE LA PARROQUIA PUJILÍ (MATRIZ) CANTÓN PUJILÍ PROVINCIA DE COTOPAXI*. Obtenido de Universidad Tecnica De Cotopaxi: <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/8255dc5e-79ce-474a-9b69-2ab359f9350d/content>

Buestan, M. (12 de Diciembre de 2022). *Universidad Nacional De Chimborazo*. Obtenido de Gestión de la producción y la comercialización de leche en la parroquia Octavio Cordero Palacios de Cuenca.: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10144>

Cardenas, L. (02 de Febrero de 2023). *Modelado de cambios en la estructura del suelo causados por el pisoteo del ganado*. Obtenido de ELSERVIER: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706123000083>

- Carnero, E. (19 de Enero de 2018). *Análisis numérico de la infiltración de agua en un suelo residual no saturado mediante el uso de la curva de retención de agua*. Obtenido de Revista de Investigaciones Altoandinas: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/REVALT_151abe81036ef457b67f68089897544a/Description#tabnav
- Carranza, P. (30 de Abril de 2024). *Conservación y Manejo Sostenible del Suelo en la Agricultura*. Obtenido de Instituto Superior Los Andes: <file:///C:/Users/LeoX%20Mv/Downloads/1+Carranza,+Mercedes+et+al+2024+revisio%20n.pdf>
- Chiuma, D. (17 de Mayo de 2021). *La producción lechera a pequeña escala contribuye a la resiliencia de los hogares, la seguridad alimentaria y nutricional, además de generar ingresos en los hogares rurales*. Obtenido de ANIMAL FRONTIERS: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8127661/>
- Córdova, L., Vinueza, J., & Sánchez, M. (2020). Manejo de pasturas y su efecto sobre la estructura del suelo en sistemas ganaderos andinos. *Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal*, 22-31.
- Delgado, J. (13 de Mayo de 2015). *Biomasa forrajera bajo diferentes densidades de cobertura arbórea en una pastura del valle cálido del Magdalena Tolimense (Colombia)*. Obtenido de Revista Colombiana de Ciencia Animal : <https://revistas.ut.edu.co/index.php/ciencianimal/article/view/544>
- FAO. (22 de Marzo de 2019). *Propiedades Físicas del Suelo*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es>
- Fierro, N. (01 de Diciembre de 2020). *Sistemas familiares de producción de leche en la Amazonía Ecuatoriana desempeño comparado de las diferentes tipologías*. Obtenido de Sinergia: <https://novasinergia.unach.edu.ec/index.php/novasinergia/article/view/ns.01.06.09?>
- Guamán, J., Córdova, L., & Vinueza, J. (2019). Relación entre infiltración del suelo y producción forrajera en pastizales altoandinos. *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 67-76.

- Guevara, R. (25 de Junio de 2020). *Caracterización físico-productiva y tipologías de sistemas lecheros diversificados en la sierra de Ecuador*. Obtenido de UCUENCA: <https://investigacion.ucuenca.edu.ec/es/publications/caracterizaci%C3%B3n-f%C3%ADsico-productiva-y-tipolog%C3%ADas-de-sistemas-lecher>
- Hamza, M., & Anderson, W. (2005). oil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 121-145.
- Herrera, D. (22 de Agosto de 2024). *INNOVA*. Obtenido de Tendencias en producción lechera y mejora del rendimiento con estrategias nutricionales y de manejo : https://www.researchgate.net/publication/391001347_Tendencias_en_produccion_lechera_y_mejora_del_rendimiento_con_estrategias_nutricionales_y_de_manejoTrends_in_dairy_production_and_yield_improvement_with_nutritional_and_management_strategies/fulltext/6807
- Lal, R. (2009). Soils and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 57-64.
- Lisintuña, M. (02 de Febrero de 2020). *Universidad Tecnica De Cotopaxi*. Obtenido de DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE LOS RECURSOS SUELO Y AGUA EN ZONAS PRODUCTORAS COMUNITARIAS DE LECHE ALÁQUEZ, JOSEGUANGO Y MULALÓ DEL CANTÓN LATACUNGA 2024: <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6633>
- Marin, A. (11 de Marzo de 2024). *Importancia de los suelos en la agricultura*. Obtenido de ONDARURAL: <https://ondarural.org/ondarural.org/importancia-de-los-suelos-en-la-agricultura>
- Norton, M. (03 de Septiembre de 2018). *Métodos de estimación de la densidad aparente del suelo: una revisión*. Obtenido de ElServier: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1002016018600347?>
- Ochoa, P., Fries, A., Mejía, D., Burneo, J., Ruíz, R., & Capa, M. (2018). Effects of land use on soil properties and erosion in the Andean region of Ecuador. *Catena*, 65-75.
- Pritom, B. (13 de Junio de 2024). *Propiedades físicas del suelo: Un componente crucial de la salud y la productividad del ecosistema*. Obtenido de Red Paper: <https://www.agriculturejournal.net/archives/2024/vol6issue2/PartB/6-2-20-940.pdf>

- Requel, N. (12 de Marzo de 2015). *Caracterización de la Producción Lechera del Ecuador*. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana: file:///C:/Users/LeoX%20Mv/Downloads/jasoft,+Gestor_a+de+la+revista,+Art5.pdf
- Romero, A. (11 de Marzo de 2023). *Modelado de cambios en la estructura del suelo causados por el pisoteo del ganado*. Obtenido de El Server: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706123000083?>
- Salazar, A. (18 de Agosto de 2018). *Producción de biomasa y calidad nutricional de tres forrajes cosechados a dos alturas*. Obtenido de Universidad de Costa Rica: <https://www.redalyc.org/journal/437/43750618001/>
- Sanchez, A. (09 de Agosto de 2023). *Evaluación agronómica y nutricional de 6 gramíneas forrajeras producidas en la finca Santa*. Obtenido de Pontificia Universidad Católica del Ecuador: <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/9c8ac526-7520-45b4-9f38-b86aa9229e1c/content>
- Silva, G. (09 de Junio de 2021). *Redes neuronales convolucionales para estimar el rendimiento de materia seca en un programa de mejoramiento de pasto de Guinea utilizando teledetección con UAV*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/3971>
- Soria, R. (24 de Agosto de 2014). *Universidad Técnica de Ambato*. Obtenido de CUANTIFICACIÓN Y LOGÍSTICA DE LA BIOMASA EN CULTIVOS: <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/8d1b6361-19df-442a-82d1-20d3921dc30e/content>
- Tapan, M. (25 de Junio de 2021). *Reserva de carbono orgánico en los suelos forestales del Himalaya y otras áreas de la India*. Obtenido de Elsevier: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780128229316000071>
- Urriola, L. (26 de Abril de 2020). *Estudiar las propiedades físicas del suelo*. Obtenido de Semilla del Este: https://revistas.up.ac.pa/index.php/semilla_este/article/view/2020?
- Vera, C. (03 de Mayo de 2024). *Rendimiento de la biomasa verde y materia seca del pasto saboya (Megathyrsus maximus): utilizando diferentes niveles de biol orgánico*. Obtenido de Ciencia Latina: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/10782?>

Yangong, D. (01 de Diciembre de 2023). *Retención de agua y infiltración del suelo reducidas por biocostra en un prado alpino de Kobresia*. Obtenido de European: [https://hess.copernicus.org/articles/27/4247/2023/?](https://hess.copernicus.org/articles/27/4247/2023/)

Ze-We, Q. (11 de Noviembre de 2023). *Dinámica de la porosidad del suelo y el contenido de agua durante el barbecho de verano en los campos de trigo de secano de la meseta de Loess en China*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2073-445X/12/1/230?>