

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA.
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSERVACIÓN



**Valores de referencia de masa microbiana de suelos de la microcuenca del río Talgua
Catacamas, Olancho, Honduras.**

TESIS

Presentado como requisito parcial para obtener el título de

INGENIERO EN GESTION INTEGRAL DE LOS RECURSOS NATURALES

Por:

Esly Damary Martinez Lopez

Catacamas, Olancho

marzo 2026

**Valores de referencia de masa microbiana de suelos de la microcuenca del río Talgua,
Catacamas, Olancho, Honduras.**

Por:

Esly Damary Martínez López

Carlos Roberto Irías Zelaya, M.Sc.

Director de Tesis

TESIS

Presentado como requisito parcial para obtener el título de

INGENIERO EN GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS NATURALES

Catacamas, Olancho

marzo 202

DEDICATORIA

A Dios, por su guía, su misericordia y por darme fuerzas cuando más las necesité.

A mis padres, **Francisco Martinez** y **Suyapa Lopez** por su amor incondicional, su ejemplo de esfuerzo y la fe con la que han sostenido cada uno de mis pasos. Este logro es de ustedes. Los Amo.

A mi Lita preciosa, por todo lo que sembró en mí: sus oraciones, su ternura, sus consejos y esa forma única de dar calma. Su presencia y su amor siguen siendo parte de lo que soy, y me acompañan en cada logro.

Y me lo dedico a mí, por la constancia, por no rendirme ante las dudas y por atreverme a creer en mis capacidades.

Este logro es para los míos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida, la fortaleza en los momentos difíciles y la sabiduría para continuar.

A mis padres, por su apoyo constante, sus sacrificios silenciosos y su confianza en mí. por repetirme “sí puedes” hasta que yo también lo creí. Gracias por escucharme a cualquier hora y por estar siempre.

A mis hermanos, les agradezco por sus consejos, por sus ánimos constantes y por celebrar cada pequeño logro como si fuera el más grande. Su apoyo y cariño significan más de lo que imaginan.

A mis sobrinos, por ser mi alegría, mi esperanza y una de mis mayores motivaciones para seguir soñando. Cada sonrisa de ustedes me recordó por qué vale la pena esforzarse. (KKIEBAAC).

A mis amigas, gracias por reír y llorar conmigo, por estar a mi lado en cada momento, por escucharme, animarme y también por soportarme tanto; sé que a veces puedo ser complicada, pero aun así nunca me soltaron. Sepan que las valoro y que para mí ustedes no son solo conocidas, como siempre les dije: se convirtieron en mis hermanas, y este logro también lo llevo con ustedes.

A mi asesor principal, M.Sc. Carlos Roberto Irías Zelaya, por su guía, paciencia y valiosas orientaciones durante el desarrollo de esta investigación; y a mis asesores auxiliares, por sus observaciones, sugerencias y aportes académicos, que contribuyeron a fortalecer este trabajo.

A Don Melvin y Don Andrés, por su valiosa ayuda, su disposición y el apoyo brindado, que fue de gran importancia para alcanzar esta meta.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	OBJETIVOS	2
2.1.	Objetivo General	2
2.2.	Objetivos Específicos.....	2
III	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	3
IV	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
4.1.	Suelos	4
4.2.	Propiedades del suelo.....	5
4.2.1.	Propiedades físicas del suelo.....	5
4.2.2.	Propiedades químicas del suelo.....	6
4.2.3	Propiedades biológicas del suelo.....	7
4.2.3.1.	Respiración del suelo	8
4.2.3.2.	Diversidad Microbiana.....	8
4.2.3.3.	Presencia de macrofauna.....	9
4.3.	Microbiología del suelo y su importancia	9
4.4.	Relevancia del Suelo en Ecosistemas y la Agricultura Sostenible.....	10
4.5.	Impacto de las prácticas agrícolas en la calidad del suelo.....	11
4.5.1.	Funciones de los microorganismos en la fertilidad y salud del suelo.	12
4.5.2.	Relación entre el microbiota y los ciclos de nutrientes.	12
4.6.	Masa Microbiana.....	12
4.6.1.	Masa microbiana en suelos con y sin intervención humana.....	14
4.7.	Valores de Referencia	15
4.7.1	Importancia de los valores de referencia en suelos	15
V	MATERIALES Y MÉTODO.....	17
5.1	Ubicación del área de estudio.....	17
5.2	Delimitación del área	17
5.3	Fases del estudio	17
5.3.1.	Fase I. Muestreo	18
5.3.2.	Fase II Análisis de laboratorio.....	18
5.3.2.1.	Determinación de la Masa Microbiana del suelo	18

5.3.2.2 Determinación de la humedad del suelo.....	19
5.3.2.3. Determinación de pH de suelo	19
5.3.2.4 Determinación de materia orgánica Walkley & Black, (1934)	20
5.3.2.5. Determinación de la textura del suelo	21
5.3.2.6. Variables evaluadas.....	22
5.3.2.6.1. pH.....	22
5.3.2.6.2. Materia Orgánica.....	22
5.3.2.6.3. Textura	23
5.3.3. Fase III Análisis Estadístico.....	23
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6.1 Prueba de Normalidad.....	24
6.2 Caracterización fisicoquímica del suelo.....	25
6.2.1. Variabilidad del pH del suelo.....	25
6.2.2. Variabilidad del Carbono Orgánico del Suelo.....	28
6.2.3. Variabilidad de la Materia Orgánica del Suelo.	31
6.2.4 Porcentaje de Arena	33
6.2.5 Porcentaje de limo	36
6.2.6. Porcentaje de arcilla.	38
6.3 Variabilidad de la Masa Microbiana del Suelo.	41
6.3.1 Interpretación ecológica del suelo.....	44
6.4 Correlación entre las variables edáficas de los suelos de la microcuenca del Rio Talgua	46
6.5 Caracterización multivariada de las propiedades edáficas del suelo mediante análisis de componentes principales (CP1 –CP2).....	48
6.6 Contribución de las variables edáficas a los tres primeros componentes principales CP1, CP2 y CP3.....	49
6.7 Análisis de agrupamiento jerárquico de las muestras de suelo según variables edáficas.....	51
VII CONCLUSIONES	53
VIII. RECOMENDACIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los valores de pH en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	26
<i>Figura 2</i> Mapa de distribución espacial del pH en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua.	27
Figura 3 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de carbono orgánico en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	28
Figura 4 Mapa de distribución espacial de los porcentajes de carbono orgánico en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	30
Figura 5 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de materia orgánica en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	31
Figura 6 Mapa de distribución espacial de los porcentajes de materia orgánica en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	33
<i>Figura 7</i> Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de arena en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	34
<i>Figura 8</i> Mapa de distribución espacial de porcentajes de arena en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	35
Figura 9 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de limo en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	36
Figura 10 Mapa de distribución espacial de los porcentajes de limo en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	38
Figura 11 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de arcilla en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	39
Figura 12 Distribución espacial de los porcentajes de arcilla en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	40
Figura 13 Distribución de frecuencia y curva de densidad de la masa microbiana del suelo en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	42
Figura 14 Mapa de distribución espacial de la masa microbiana del suelo en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.	43
Figura 15 Matriz de correlación de parámetros fisicoquímicos y biológicos de los suelos analizados.	48
Figura 16 Biplot del análisis de componentes principales (ACP) entre CP1 y CP2, mostrando la	

asociación entre muestras y propiedades Fisicoquímicas del suelo en la Microcuenca del Rio Talgua.	49
Figura 17 Contribución porcentual de las propiedades fisicoquímicas del suelo a los tres componentes principales CP1,CP2 y CP3 según el análisis de componentes principales realizados en la Microcuenca del Rio Talgua.	51
Figura 18 Dendrograma resultante del análisis de clúster jerárquico de las muestras de suelo según sus variables edáficas de la Microcuenca del Rio Talgua.	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a variables fisicoquímicas y biológicas del suelo en la Microcuenca del Rio Talgua.....	25
Tabla 2 Interpretación ecológica del estado del suelo en la Microcuenca del Rio Talgua.....	45

MARTINEZ LOPEZ, E.D. 2026. Valores de referencia de masa microbiana de suelos de la microcuenca del río Talgua Catacamas, Olancho, Honduras. Informe Final de Investigación Ing. Catacamas, Olancho Universidad Nacional de Agricultura.72p.

RESUMEN

La masa microbiana del suelo(MMS)constituye un indicador sensible del funcionamiento biológico y del estado ecológico de los suelos, ya que refleja la fracción activa de microorganismos responsables de los procesos de descomposición, mineralización y ciclado de nutrientes. La presente investigación tuvo como objetivo establecer valores de referencia de masa microbiana en suelos vírgenes de la microcuenca del Rio Talgua, Catacamas, Olancho, con el fin de generar una base científica que permita evaluar la calidad del suelo en contextos similares. Se realizó un muestreo al azar en cuatro comunidades de la microcuenca: Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de agua, obteniéndose un total de 77 muestras de suelo. Se analizaron propiedades físico-químicas como pH, textura (arena, limo y arcilla), humedad, carbono orgánico (CO) y materia orgánica (MO), además de la determinación de masa microbiana del suelo mediante método de fumigación – extracción.

Para el análisis estadístico se aplicaron pruebas de normalidad, correlaciones de spearman y análisis multivariado mediante componentes principales (ACP), con el propósito de evaluar la relación integrada entre variables edáficas y biológicas Los resultados mostraron que la masa microbiana del suelo (MMS) tuvo una distribución asimétrica positiva, concentrándose principalmente en rangos moderados a altos, lo que sugiere un buen estado biológico en la mayoría de los sitios. La MMS se correlaciono positiva y significativamente con el carbono orgánico, la materia orgánica y la humedad, confirmando su influencia en la actividad microbiana. Además, el ACP indico que la variabilidad del suelo se explica sobre todo por la interacción entre textura, carbonó y humedad. Con base en cuartiles, se definieron rangos ecológicos para clasificar la MMS desde muy baja hasta extremadamente alta, útiles como referencia para monitoreo y estudios futuros.

Palabras Clave: Masa microbiana del suelo; carbono orgánico; valores de referencia, suelos.

I. INTRODUCCIÓN

El suelo constituye un componente fundamental de los ecosistemas terrestres y un recurso estratégico para el desarrollo de las comunidades, debido a su función en la producción agrícola, la regulación de los ciclos biogeoquímicos y el mantenimiento de biodiversidad microbiana. En regiones con alta riqueza biológica, como la microcuenca del río Talgua, conservación resulta especialmente relevante, ya que sustenta tanto la estabilidad ecológica como las actividades productivas de las comunidades.

Dentro de estos componentes, la masa microbiana del suelo destaca como un indicador sensible y confiable de la salud edáfica, ya que integra la actividad de los microorganismos responsables del proceso fundamentales para la fertilidad y el equilibrio del suelo. A pesar de su importancia, en la microcuenca del río Talgua no se dispone de valores de referencia de masa microbiana en suelos sin intervención humana, lo que limita la posibilidad de comparar objetivamente el efecto de las actividades humanas sobre la calidad biológica del suelo. Esta carencia de información científica representa una problemática para la evaluación, monitoreo y conservación de este recurso.

En respuesta a esta necesidad, la presente investigación se plantea como una contribución al conocimiento de la dinámica biológica del suelo en ecosistemas conservados, mediante la generación de valores de referencia de masa microbiana en áreas sin intervención humana. La justificación del estudio radica en que dichos valores permitan contar con una base comparativa para evaluar la salud edáfica en la microcuenca del río Talgua, facilitando la identificación de posibles alteraciones asociadas al uso del suelo y fortaleciendo los criterios técnicos para su manejo y conservación

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Determinar los valores orientadores de masa microbiana de los suelos de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de agua en la microcuenca del río Talgua Catacamas, Olancho.

2.2. Objetivos Específicos

- Cuantificar la masa microbiana en suelos sin intervención humana de las comunidades de Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, Ubicadas en la microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.
- Analizar la masa microbiana, el pH, la materia orgánica, humedad y la textura de los suelos sin intervención humana de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de agua de la microcuenca del Río Talgua.
- Establecer valores de referencia de la masa microbiana del suelo, mediante análisis estadístico, como criterio para la evaluación de la salud edáfica en las áreas del estudio.

III PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

3.1 ¿Cuáles son los valores de referencia de la masa microbiana en diferentes tipos de suelo dentro de la microcuenca del río Talgua?

3.2 ¿Qué factores edáficos como el pH, contenido de materia orgánica y textura influyen en la biomasa microbiana en los suelos de la microcuenca del río Talgua?

IV REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Suelos

El suelo es un recurso natural esencial para la existencia en nuestro planeta, visto como un sistema vivo y dinámico que surge de la compleja interacción entre componentes minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos (FAO,1995). Su formación es un proceso extremadamente pausado que puede tomar siglos, producto de la interacción entre el clima los organismos, el relieve, la roca madre y el paso del tiempo (USDA2021). El suelo esta principalmente formado por partículas minerales como arena, limo y arcilla que definen su textura, porosidad habilidades para retener agua y aireación, influyendo en la infiltración y circulación del agua y nutrientes.

Además, su componente mineral, los poros del suelo albergan agua y aire, componentes esenciales para la existencia. El agua funciona como medio para el traslado de nutrientes y la defensa de la biota microbiana, mientras que el aire proporciona oxígeno a las raíces y a las especies que habitan en el suelo. (Zhang 2025).

La materia orgánica es otro elemento fundamental compuesta por residuos de plantas, animales y microorganismos en procesos de degradación, como lo señala Zhang (2025) En ella el humus sobresale como la parte más estable y abundante en nutrientes con la habilidad de mejorar significativamente la estructura del suelo, incrementar su habilidad para mantener la humedad y funcionar como un reservorio de elementos esenciales como el nitrógeno, fosforo y potasio. Según la FAO (1995), esta materia orgánica también juega un papel esencial en la captura de carbono ayudando de esta manera a mitigar el cambio climático. Ligado a esto, la biota del suelo que incluye desde lombrices e insectos hasta bacterias, hongos y arqueas representa el

fundamento de un ecosistema sumamente variado. Estos seres vivos degradan la materia orgánica, reutilizan nutrientes, airean el suelo y forman estructuras estables, asegurando así la fertilidad a largo plazo (Sociedad de Ciencias del Suelo de América 2022.).

4.2. Propiedades del suelo.

Las propiedades del suelo se definen como el conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas que definen su comportamiento y habilidad para mantener la vida FAO (2015) Estas características definen a interacción suelo con el agua, el aire, los nutrientes y los seres vivos que lo habitan. La fertilidad, la estructura y la productividad de la agricultura dependen de su equilibrio, además de su papel como regulador ecológico. En términos generales, se clasifican en propiedades físicas, químicas y biológicas, cada una de ellas influye en el ciclo de nutrientes y en la sostenibilidad de los ecosistemas

4.2.1. Propiedades físicas del suelo

Las características físicas del suelo son las propiedades vinculadas a su estructura, composición y reacción frente a elementos como el agua aire y temperatura. Estas propiedades establecen la habilidad del suelo para respaldar el desarrollo vegetal y preservar su productividad a largo plazo FAO (2015) Entre ellas sobresalen la textura, la porosidad y el color, que facilitan la valoración de la calidad física del suelo y guían estrategias de gestión apropiadas. Su comprensión es fundamental para la agricultura, ya que influyen directamente en la disponibilidad de recursos para las plantas, la actividad biológica y la resistencia ante procesos de degradación.

Dentro de estas propiedades, el equilibrio relativo entre arena, limo y arcilla tiene un rol crucial en la dinámica del agua y del aire en el suelo. Esta proporción llamada textura, establece el tipo de suelo y su reacción ante la permeabilidad, la aireación y la conservación de agua y nutrientes FAO (2009). Ya que las partículas poseen tamaños variados, su mezcla afecta la eficacia de gestión del terreno y la resistencia que resiste la penetración radicular. Además, la textura determina el potencial productivo de los suelos y guía la elección de los cultivos y métodos de laboreo más apropiado.

Otra característica fundamental es el volumen de espacios vacíos que existen entre las partículas sólidas, conocido como porosidad. Esta característica regula el desplazamiento y almacenamiento de agua, aire y nutrientes, impactando en el desarrollo radicular, la infiltración y la presencia de elementos vitales según Bribiesca (2021). Un suelo con una porosidad balanceada promueve la proliferación de microorganismos, optimiza el drenaje y evita dificultades como la compactación. Además, este elemento afecta la temperatura y la humedad del perfil edáfico del suelo, impactando de forma indirecta en la actividad fotosintética y en el rendimiento de los cultivos.

El aspecto visual del suelo, expresado por su color, proporciona indicaciones útiles acerca de su composición y condición. Las variaciones cromáticas pueden estar relacionadas con la presencia de minerales, materia orgánica o variaciones en la cantidad de humedad. FAO (2009). En áreas agrícolas, es común que las zonas superiores muestren tonalidades más claras que las inferiores, a causa de una humedad inferior o erosión que revela las capas internas. Los tonos oscuros generalmente se relacionan con una mayor cantidad de materia orgánica. Los tonos rojizos o amarillentos señalan óxidos de hierro. Este indicador, pese a ser sencillo, es valioso para guiar decisiones relacionadas con la gestión y conservación.

4.2.2. Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo comprenden el conjunto de características que determinan la disponibilidad y el equilibrio de los nutrientes esenciales para las plantas. Estas propiedades influyen directamente en la fertilidad del suelo, la productividad agrícola y la sostenibilidad de los sistemas de cultivo. Factores como el pH, la salinidad, la conductividad eléctrica (CE) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) son indicadores clave para evaluar la calidad química del terreno. Comprender estos parámetros permite seleccionar adecuadamente los cultivos, diseñar estrategias de manejo y prevenir problemas de degradación o pérdida de productividad en el tiempo.

El coeficiente de conductividad (CE) es la habilidad para solucionar el problema de suelo para trasladar la corriente de corriente terrestre eléctrica según su contenido de sales disueltas o ionizadas en el ácido láctico respuesta USDA (1999). Por ende, por lo tanto, a mayor CE, la CE aumenta. presencia de sales. Esta característica química del terreno facilita la elección del tipo de cultivo posibilita la elección del

tipo de cultivo que se desea cultivar. y diversidad a determinar conforme sea necesario con su capacidad para adaptarse a los niveles de La salinidad del suelo, el sistema de irrigación ya sea en surcos o en melgas, y la fuerza y/o regularidad del sonido de la división. (Cortés *et al.* 2013)

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH₄ etc.). Esta característica química del suelo hace referencia a la suma total de cargas negativas presentes en la superficie de las partículas presentes en el suelo. Además, se puede describir como la cantidad total de cationes intercambiables que un suelo específico tiene la capacidad o capacidad de retener (cantidad total de carga negativa). Es crucial conocer la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de un suelo, ya que este valor nos muestra la capacidad de un suelo para retener e intercambiar nutrientes. Además, la CIC tiene un impacto directo en la cantidad y regularidad de uso de fertilizantes. (FAO 2024)

La CIC recibe el mayor impacto de las arcillas del suelo y de la materia orgánica. La arcilla posee una capacidad de 10-150 cmol (+) /kg, en cambio, la materia orgánica puede tener una capacidad de 200-400 cmol (+) /kg, lo que significa que la materia orgánica posee una CIC más elevada. Los cmol (+) /kg corresponden a meq/100g. Además de incrementar la CIC, las aportaciones de materia orgánica también potencian las características físicas del suelo, potencian la infiltración de agua, optimizan la estructura del suelo, suministran nutrientes a la planta y reducen las pérdidas debido a la erosión. En contraste, los aniones presentes en el suelo exhiben una conducta muy diferente a la de los cationes. El fosfato se retiene intensamente a causa de la rápida creación de compuestos insolubles. (Cortés *et al.* 2013)

4.2.3 Propiedades biológicas del suelo

Las propiedades biológicas del suelo son el conjunto de características relacionadas con la presencia, diversidad, actividad y funciones de los organismos vivos que habitan en él. Estas propiedades incluyen tanto a microorganismos (como bacterias y hongos) como a organismos de mayor tamaño (como lombrices e insectos), los cuales intervienen en procesos esenciales como el procesamiento de la materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y la formación de la

estructura del suelo. Su estudio permite evaluar la salud del suelo, su capacidad para sostener cultivos y su contribución al equilibrio ecológico. (Microbiology-and Ecology 2015)

La biomasa microbiana representa la fracción viva de los microorganismos que habitan en el suelo, como bacterias y hongos. Estos organismos cumplen funciones fundamentales en la transformación de residuos orgánicos y en la liberación de nutrientes esenciales para las plantas. Su presencia indica un suelo activo y saludable desde el punto de vista biológico. Además, se utiliza como un indicador sensible para evaluar cambios en el uso del suelo y su calidad. Un suelo con mayor biomasa suele tener mejor fertilidad y estructura. (FAO 2015)

Las enzimas presentes en el suelo, producidas por microorganismos y raíces, desempeñan un papel clave en los procesos de procesamiento y transformación de nutrientes. Estas sustancias aceleran reacciones bioquímicas que permiten liberar compuestos útiles para las plantas. Evaluar su actividad ayuda a entender el funcionamiento ecológico del suelo y su capacidad para sostener cultivos. Cuando las enzimas están activas, el suelo responde mejor a las prácticas agrícolas sostenibles. Su medición es útil para diagnosticar la calidad biológica del suelo. (Cortés et al. 2013)

4.2.3.1. Respiración del suelo

La respiración del suelo es el proceso mediante el cual los organismos vivos liberan dióxido de carbono al descomponer la materia orgánica. Este fenómeno refleja la intensidad de la actividad biológica dentro del suelo. Su análisis permite conocer cuán dinámico es el ecosistema edáfico y si existe equilibrio en los procesos naturales. Un aumento en esta actividad puede deberse a suelos ricos en materia orgánica o, en algunos casos, a perturbaciones por manejo inadecuado. Por ello, es un parámetro clave para evaluar la vitalidad del suelo. (Yanez Diaz 2017)

4.2.3.2. Diversidad Microbiana

La diversidad microbiana alude a la variedad de especies de microorganismos que conviven en

el suelo, como bacterias, arqueas y hongos. Esta diversidad es vital porque cada grupo cumple funciones ecológicas específicas que contribuyen al equilibrio y funcionamiento del ecosistema. Cuanta mayor diversidad, mayor será la capacidad del suelo para resistir perturbaciones como la contaminación o los cambios climáticos. También mejora la capacidad del suelo para mantener su fertilidad a largo plazo. Conservar esta diversidad es clave para lograr sistemas agrícolas resilientes (FAO 2021).

4.2.3.3. Presencia de macrofauna

Los organismos grandes que viven en el suelo, como lombrices, insectos y otros invertebrados, forman parte de la macrofauna y cumplen funciones ecológicas esenciales. Su actividad contribuye a la aireación, mezcla de partículas del suelo y fragmentación de residuos orgánicos. Esto favorece la infiltración de agua, mejora la estructura del suelo y crea un ambiente propicio para las raíces. Además, su presencia es un buen indicador de la salud del suelo, ya que responden a cambios en el manejo agrícola o contaminación (FAO 2021).

4.3. **Microbiología del suelo y su importancia**

La microbiología del suelo es una rama de la ciencia del suelo que estudia los microorganismos del suelo, al suelo como hábitat microbiano y los procesos bioquímicos que permiten el incremento de la productividad agropecuaria, la rehabilitación y conservación de los suelos. El suelo es considerado un organismo vivo en el que los microorganismos cumplen un papel fundamental en su génesis, a través de los procesos de transformación del material parental y la materia orgánica contribuyendo a su fertilidad. (MMS 2022)

Es importante agregar que la microbiología del suelo es esencial para la productividad agrícola, debido a los diversos beneficios de los microorganismos en las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas. El análisis microbiológico del suelo surge como una herramienta importante para evaluar la calidad del suelo y el potencial productivo. El creciente interés en la

microbiología del suelo se debe a la contribución de los microorganismos a la productividad y sostenibilidad agrícola. (Arciniegas 2023)

4.4. Relevancia del Suelo en Ecosistemas y la Agricultura Sostenible

La agricultura sostenible significa cultivar de forma en que se preserve la salud de la gente y de la tierra a largo plazo. Los agricultores que aplican métodos sostenibles tratan de producir los alimentos nutritivos que sus familias y la comunidad necesitan y al mismo tiempo conservar el agua, mejorar los suelos y guardar las semillas para el futuro. (Conant y Fadem 2011)

González (2023) indica que es aquella que garantiza la satisfacción de las necesidades nutricionales básicas de las generaciones actuales y futuras, y aporta diversos beneficios económicos, sociales y ambientales. Existen diversos enfoques de agricultura sostenible, estos son: agricultura climáticamente inteligente, agricultura ecológica, agricultura biodinámica, agricultura de intensificación sostenible y agricultura regenerativa.

La sostenibilidad en el manejo de suelos es un aspecto crucial para garantizar la salud del medio ambiente y la producción agrícola a largo plazo, en el manejo de suelos es fundamental para asegurar la producción alimentaria, proteger el medio ambiente y mitigar el cambio climático. Implementar prácticas adecuadas es esencial para conservar este recurso vital y garantizar su disponibilidad para las generaciones futuras. (Carranza Patiño *et al.* 2024)

Pilatti y Orellana (1954) plantean que este concepto se relaciona con la capacidad de los suelos para cumplir funciones básicas que garanticen un ambiente productivo y saludable. Históricamente, la humanidad usó los suelos como receptores de residuos (autodepuración por biodegradación de desechos urbanos, industriales o agropecuarios), extendidos superficialmente o incorporados a él para reciclar sus componentes orgánicos, haciéndolos reutilizables en algún proceso productivo.

La salud del suelo se ha definido como su capacidad para funcionar como un sistema vivo. Los suelos sanos mantienen una comunidad variada de organismos del suelo que ayudan a controlar

las enfermedades de las plantas, insectos y malezas, forman asociaciones simbióticas beneficiosas con las raíces, reciclan nutrientes esenciales para las plantas, mejoran la estructura del suelo con efectos positivos para el agua del suelo y la capacidad de retención de nutrientes, y en última instancia mejoran la producción agrícola. Un suelo sano también contribuye a la mitigación del cambio climático, manteniendo o aumentando su contenido de carbono. (FAO 2015)

Los indicadores son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos, y son usados en muchas esferas del conocimiento (economía, salud, recursos naturales, etc.). Los indicadores de la calidad del suelo pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas, o los procesos que ocurren en él, sin embargo, analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible, analizar los posibles impactos antes de una intervención, monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas y ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible son algunos de los principales indicadores. (García et al. 2012)

Por otro lado, USDA *et al.* (2000) afirman que los indicadores más útiles son aquellos que reaccionan al cambio y se modifican en respuesta a la gestión. La variedad y el número de indicadores empleados se determinan por la escala de evaluación (es decir, campo, granja, cuenca o región) y las funciones relevantes del terreno. Por ejemplo, el ritmo de infiltración y la estabilidad de los agregados señalan la habilidad del terreno para absorber agua y resistir el efecto de escorrentía y erosión. Las variaciones en la composición orgánica del suelo, ya sea el carbono orgánico activo o la composición orgánica del suelo en partículas, pueden señalar alteraciones en la productividad.

4.5. Impacto de las prácticas agrícolas en la calidad del suelo.

Las prácticas agrícolas ejercen un impacto fundamental en la biota del suelo, sus actividades y diversidad. La deforestación o conversión de praderas para cultivos agrícolas afectan de manera drástica el ambiente del suelo llevando a la reducción del número y especies de organismos.

Además, la reducción de la cantidad y calidad de residuos vegetales incorporados al suelo y la reducción en número de especies de plantas superiores lleva a cabo a la reducción en el rango de hábitat y fuentes de alimentación para los organismos del suelo. (Torres *et al.*, 2024)

4.5.1. Funciones de los microorganismos en la fertilidad y salud del suelo.

Los microorganismos del suelo son responsables de una serie de actividades, como el ciclo de nutrientes, la descomposición de residuos vegetales y la formación de materia orgánica en el suelo, contribuyendo positivamente a la estructura y otras características físicas del suelo. Además, los microorganismos actúan en varios procesos que favorecen el crecimiento de las plantas, como la fijación biológica de nitrógeno, convirtiendo el nitrógeno atmosférico en especies nitrogenadas que son absorbidas por las plantas. (Osorio Vega 2009)

4.5.2. Relación entre el microbiota y los ciclos de nutrientes.

Los microorganismos de la rizosfera participan en el reciclaje geoquímico de los nutrientes y determinan su disponibilidad para las plantas y la comunidad microbiana del suelo. Por ejemplo, en la rizosfera hay organismos capaces de fijar N₂ formando estructuras especializadas (p.e. *Rhizobium* y géneros relacionados) o simplemente estableciendo relaciones asociativas (p.e. *Azospirillum*, *Acetobacteria*). De otro lado, las bacterias modificantes y nitrificantes son responsables de la conversión de compuestos de N orgánico a formas inorgánicas (NH₄⁺ y NO₃⁻), las cuales son disponibles para las plantas. (Osorio Vega, 2009).

4.6. Masa Microbiana.

La masa microbiana alude a la cantidad de biomasa que constituyen los microorganismos en un volumen específico de terreno o ambiente. Dentro del ámbito de la microbiología del suelo, la

cantidad de microorganismos es un marcador esencial de la actividad biológica y la salud del ecosistema terrestre. Es conocido como el elemento funcional del microbiota terrestre, encargado principalmente del tratamiento de la materia orgánica y del reciclaje de nutrientes. La biomasa microbiana se manifiesta en términos de carbono (C) y nitrógeno (N), siendo su evaluación esencial para valorar el efecto de prácticas agrícolas y modificaciones ambientales en la fertilidad del terreno (Acosta & Paolini, 2006).

La masa microbiana es un indicador clave de la salud y calidad del suelo, ya que refleja la cantidad de microorganismos presentes en un volumen específico de suelo y su actividad funcional. Esta masa microbiana está compuesta por la biomasa de bacterias, hongos, actinobacterias y otros microorganismos que desempeñan roles esenciales en los ciclos biogeoquímicos, como la descomposición de materia orgánica y el reciclaje de nutrientes. Un aumento en la masa microbiana generalmente indica un suelo más saludable, capaz de sostener procesos ecológicos vitales, mientras que una disminución puede indicar problemas como la degradación del suelo o la pérdida de fertilidad. (Gutiérrez Barriga 2006)

La cantidad de biomasa microbiana nos indica el potencial del suelo para reciclar nutrientes. Según Toledo (2020), “un aumento en la masa microbiana está directamente relacionado con una mayor capacidad de mineralización de la materia orgánica y disponibilidad de nutrientes para las plantas”. Sistemas con manejo sostenible, como la agricultura de conservación o la incorporación de abonos orgánicos, tienden a presentar valores más altos que sistemas con laboreo intensivo o uso excesivo de agroquímicos, lo cual refleja un mayor equilibrio biológico y resiliencia del ecosistema edáfico (AGVISE, s.f.).

Para su análisis, uno de los métodos más usados es la fumigación-extracción con cloroformo, que “mide el carbono microbiano liberado tras la destrucción de las membranas celulares de los microorganismos” (Australia Soil Quality, s.f.). Otros métodos incluyen la respiración inducida por sustrato, la cuantificación de ATP y el análisis de ácidos grasos fosfolipídicos (Pertile *et al.*, 2020). Herramientas recientes como microBIOMETER® permiten estimar en campo la biomasa y la relación hongos/bacterias “en menos de 20 minutos y con alta precisión” (microBIOMETER®, 2025), lo que facilita el monitoreo rápido de la salud del suelo.

La masa microbiana no solo es un indicador biológico, sino que “integra aspectos físicos, químicos y biológicos del suelo, reflejando su capacidad para sostener la producción y la biodiversidad” Dalal (1998). Su disminución puede advertir de forma temprana procesos de degradación, como pérdida de materia orgánica, compactación o salinización (AGVISE, s.f.). Además, su variabilidad con la humedad demuestra que “las condiciones óptimas de agua son determinantes para mantener la actividad microbiana y el ciclado de nutrientes” (Australia Soil Quality, s.f.), siendo clave en la evaluación de la sostenibilidad agrícola.

4.6.1. Masa microbiana en suelos con y sin intervención humana.

La concentración de microorganismos en suelos con intervención humana hace referencia a la cantidad y variedad de microorganismos que se ven afectados por acciones humanas, tales como: La aplicación desmedida de pesticidas y fertilizantes químicos puede disminuir la variedad de microorganismos y modificar las comunidades naturales del terreno, la supresión de vegetación natural disminuye la aportación de materia orgánica al terreno, impactando de manera negativa en la biomasa de los microorganismos, la transformación de ecosistemas naturales en terrenos agrícolas o urbanos puede provocar una reducción considerable de la biodiversidad de microorganismos y, consecuentemente, una reducción en la calidad del suelo (Vallejo 2013).

El estudio de suelos sin intervención humana ha evidenciado que estos ecosistemas resulten fundamentales para comprender las dinámicas naturales de los ecosistemas, LBELN (2023) ha demostrado que los terrenos forestales poseen una actividad microbiana y diversidad superior en comparación con los lugares que han sido intervenidos por el humano, lo que resulta en mejores características físicas y químicas del suelo. Adicionalmente, los microorganismos presentes en estos terrenos se relacionan con las raíces de las plantas mediante la simbiosis, tal como sucede con los hongos micorrícicos orbiculares. (Beltrán Pineda *et al.* 2017)

4.7. Valores de Referencia

Los valores de referencia en suelos son estándares establecidos que indican las concentraciones aceptables de diversas sustancias químicas en el suelo, lo que permite determinar su aptitud para diferentes usos, como la agricultura, la construcción o la conservación ambiental. Estos valores son cruciales para asegurar que el suelo no represente un riesgo para la salud humana ni para el medio ambiente. (Valores de Referencia para Sustancias Químicas en Suelo 2015).

4.7.1 Importancia de los valores de referencia en suelos

Los valores de referencia son herramientas que se emplean para comparar los resultados de los análisis de suelo y evaluar si los niveles de nutrientes son apropiados para el crecimiento óptimo de las plantas. Estos valores definen rangos que se clasifican como óptimos, adecuados o deficientes, dependiendo de las necesidades específicas de cada cultivo. Al tener acceso a esta información, los agricultores pueden detectar tanto deficiencias como excesos de nutrientes en el suelo, lo que les permite aplicar estrategias adecuadas de fertilización y enmienda. (EGC 2023)

Los valores de referencia son guías interpretativas o puntos de referencia que describen el rango típico o la línea base de una propiedad del suelo en condiciones saludables, no perturbadas o con niveles de riesgo aceptables. Estos valores permiten clasificar el estado de un suelo en categorías como "Muy bajo," "Bajo," "Moderado," "Bueno," o "Muy Bueno" para parámetros como el carbono orgánico o el pH. Su propósito principal es proporcionar un marco para comprender el estado actual del suelo en relación con un estándar establecido, facilitando una evaluación rápida del sitio. (Bolton, *et al.* 1985).

Los valores de referencia en estudios de calidad del suelo suelen determinarse a partir de suelos vírgenes o no intervenidos, debido a que estos representan las condiciones naturales originales del ecosistema. En este estado, el suelo mantiene su equilibrio físico, químico y biológico, sin alteraciones significativas por actividades humanas como agricultura intensiva, deforestación o

uso de agroquímicos. Este punto de partida permite identificar los niveles óptimos y naturales de nutrientes, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica y otros indicadores. Así, cualquier desviación de estos valores en suelos manejados o degradados puede interpretarse como resultado de impactos antrópicos, lo que facilita diseñar estrategias de manejo y restauración basadas en condiciones originales y sostenibles. (Dalal, R. C. 1998)

La relación entre los valores de referencia y la masa microbiana del suelo radica en que estos valores permiten establecer un punto de comparación para evaluar la salud y funcionalidad del ecosistema edáfico. La masa microbiana, medida comúnmente como carbono microbiano (MBC), representa la fracción viva de la materia orgánica y actúa como un indicador sensible de cambios en el manejo del suelo, su uso y su estado de conservación. Cuando los valores obtenidos en campo se comparan con los valores de referencia provenientes de suelos vírgenes o en buen estado es posible identificar si un suelo mantiene su capacidad de ciclar nutrientes y sostener la productividad biológica, o si presenta signos de degradación y pérdida de calidad (Anderson y Domsch, 1989).

Además, esta relación es clave en el monitoreo de prácticas agrícolas sostenibles, ya que valores de masa microbiana cercanos o superiores a los rangos de referencia sugieren un equilibrio funcional en la comunidad microbiana, con buena disponibilidad de nutrientes y adecuada resiliencia frente a perturbaciones. Por el contrario, valores significativamente menores pueden indicar reducción de la actividad biológica por compactación, erosión, exceso de agroquímicos o pérdida de materia orgánica. Así, la comparación con valores de referencia no solo ofrece un diagnóstico del estado actual del suelo, sino que también orienta estrategias de recuperación y manejo adaptado para restablecer su equilibrio biológico (Jenkinson y Ladd, 1981).

V MATERIALES Y MÉTODO

5.1 Ubicación del área de estudio

La investigación se realizó en la microcuenca del río Talgua, situada en el municipio de Catacamas y formando parte de la cuenca del río Patuca, en el oriente de Honduras, abarca una extensión de 8,531 hectáreas. La microcuenca del río Talgua, un territorio que presenta una diversidad de usos del suelo, incluyendo áreas naturales y zonas dedicadas a la agricultura. Esta elección se fundamenta en su relevancia para evaluar la masa microbiana y otros parámetros del suelo. La región está situada a una altitud promedio de 500 metros sobre el nivel del mar, con un clima tropical húmedo, caracterizado por una precipitación anual promedio de 1,200 mm y temperaturas que rondan los 25 °C. (Castañeda y Villatoro 2006)

5.2 Delimitación del área

Para definir el área de estudio se trabajó únicamente en sitios sin intervención humana, seleccionados dentro de las comunidades de Buena Vista, Pinabetal, Flor del Café y Quebrada de Agua. La delimitación se realizó mediante un receptor GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para registrar los límites geográficos, y se utilizó el software ArcGIS Pro-3.3.0 para elaborar mapas detallado de las áreas seleccionadas.

5.3 Fases del estudio

El estudio se centró en tres fases claves. En primer lugar, se realizó la identificación de cuatro áreas sin intervención humana y muestreo de suelo. En la segunda fase, se llevaron a cabo análisis de laboratorio detallados, que incluyeron la determinación de la masa microbiana

(fumigación, extracción y cuantificación de carbono), el pH, la materia orgánica y la textura del suelo. Finalmente, se efectuó un análisis estadístico riguroso de los datos obtenidos para interpretar los resultados y extraer conclusiones significativas.

5.3.1. Fase I. Muestreo

En la primera fase del muestreo se seleccionaron suelos sin intervención humana en cuatro comunidades de la microcuenca del río Talgua (Buena Vista, Pinabetal, Flor del Café y Quebrada de Agua) En el área se identificaron y georreferenciaron en todos los sitios de muestreo, en cada sitio se tomaron muestras compuestas al azar, correspondientes a la capa superficial del suelo de 0-20 cm, recolectando en total 77 muestras. Cada muestra compuesta se formó a partir de la mezcla de cinco sub muestras tomadas al azar con un barreno, las sub muestras se mezclaron hasta conseguir una mezcla homogénea, la cual se colocó en bolsas plásticas y se etiquetaron con su respectiva información para posteriormente ser trasladadas inmediatamente al laboratorio de suelos agrícolas de la Universidad Nacional de Agricultura para la realización de sus respectivos análisis.

5.3.2. Fase II Análisis de laboratorio

5.3.2.1. Determinación de la Masa Microbiana del suelo

Para determinar la masa microbiana, las muestras de suelo, inmediatamente después de su recolección y al llegar al laboratorio, fueron retiradas de las bolsas y tamizadas con un tamiz de 4 mm con el fin de obtener una muestra homogénea, luego se pesaron 20 g de suelo y se colocaron en matraces Erlenmeyer de 100 ml. (Se pesaron cuatro muestras dos destinadas a la fumigación y dos sin fumigación). Inmediatamente después de pesar la muestra de suelo, se agregó 1 ml de cloroformo sin etanol utilizando una pipeta graduada de 1 ml a todas las muestras destinadas a la fumigación. Luego se cerraron con papel parafilm para asegurar que el cloroformo utilizado en la fumigación se mantuviera dentro y evitar su evaporación, se almacenaron en un lugar oscuro durante 24 horas, manteniendo una temperatura ambiente de alrededor de 25 °C.

La extracción se realizó, pasado este tiempo de la fumigación, se abrieron los Erlenmeyer en una campana extracción, permitiendo así que se evaporara todo el cloroformo presente hasta su completa eliminación, realizando el mismo procedimiento con las muestras no fumigadas. Seguidamente se agregaron 80 ml de solución de sulfato de potasio (K_2SO_4) al 0.5 M, utilizando un dosificador de 80 ml. Se agito durante 30 minutos a 200 rpm, luego se decantó y filtro el sobrenadante sobre papel de filtro (Whatman n°1). El mismo procedimiento de extracción se efectuó para las muestras con suelo no fumigado correspondiente a cada muestra fumigada.

Para la determinación de carbono microbiano se transfirió 8 ml del extracto previamente filtrado a un matraz Erlenmeyer de 250 ml. A continuación, se añadieron 2 ml de solución de dicromato de potasio 0.066 M, 10 ml de ácido sulfúrico PA y 5 ml de ácido ortofosfórico PA, todo utilizando un dosificador y en el orden cronológico adecuado. Se esperó a que la mezcla se enfríe y se agregaron 70 ml de agua desionizada. Luego, la mezcla se enfrió nuevamente y se añadieron 4 gotas de difenilamina como indicado. Finalmente, la solución se valoró bajo agitación magnética con una solución de sulfato de amonio 0.033 M. Al final de la titulación, el color de la solución cambio de morado, a verde (FAO,2023).

5.3.2.2 Determinación de la humedad del suelo

Para la determinación de la humedad del suelo se registró el peso de los recipientes de aluminio empleando una balanza, a continuación, se colocó una porción de suelo, que previamente llego al laboratorio y se anotó el peso en conjunto y posteriormente las muestras se introdujeron en un horno de secado a una temperatura contante de 105 °C durante 24 horas. Transcurrido este tiempo se retiraron del horno y se dejaron a enfriar a temperatura ambiente para ser pesados nuevamente (Lorenzini *et al.* 2007)

5.3.2.3. Determinación de pH de suelo

El procedimiento para medir el pH del suelo comenzó con la calibración del pH-metro, utilizando soluciones tampón con valores de pH 7.0, 4.0 y 10.0 para garantizar la exactitud de

las mediciones. Luego, se pesaron 10 gramos de suelo previamente secado al aire y tamizado con una malla de 2 mm, los cuales se colocaron en vasos plásticos de 50 ml. Para asegurar la validez del proceso, se incluyó una muestra de control por cada 10 muestras analizadas. Seguidamente, se agregaron 25 ml de agua desionizada al recipiente con el suelo, mezclando cuidadosamente, utilizando una varilla de plástico y evitando cualquier contaminación externa. La muestra preparada se agitó cada 20 minutos durante el primer lapso de una hora y transcurrida la primera hora se tomó la primera lectura posteriormente se continuó con una segunda y tercera lectura al cumplirse las dos y tres horas. (ISSSA, 1996)

Antes de realizar la medición, se agitó nuevamente la muestra preparada, y se introdujo el electrodo del pH-metro en la muestra y se esperó un intervalo de 5 a 10 segundos para permitir que el equipo se estabilizara garantizando una lectura más confiable. Fue esencial mantener un procedimiento uniforme para todas las muestras. Finalmente, se registró el valor del pH obtenido, mediante tres lecturas, efectuadas en intervalos de una hora, siendo la última la lectura final.

5.3.2.4 Determinación de materia orgánica Walkley & Black, (1934)

El análisis de carbono orgánico en muestras de suelo inició pesando 1.00 g de suelo tamizado a 2.00 mm g, que se colocó en un matraz Erlenmeyer de 300 ml. Luego, se adicionó 10 ml de una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) a una concentración de 0.167 M (1 N) y se mezcló suavemente para incorporar completamente el suelo a la solución.

Seguidamente, se vertieron 20 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrados directamente sobre la suspensión. La mezcla se agitó inicialmente con movimientos suaves y posteriormente de manera vigorosa durante un minuto para asegurar una adecuada interacción entre el suelo y los reactivos. La solución se dejó reposar por 30 minutos bajo una campana extractora para permitir que la reacción se estabilizara.

Después del reposo, se diluyó la mezcla añadiendo 200 ml de agua al matraz. Seguidamente, se incorporaron de 3 a 4 gotas de indicador de ferroína 0.025M y se procedió a titular con sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) a una concentración de 0.5 M (0.5 N). Durante la titulación, el punto final se determinó por los cambios de color: la solución paso de un tono verdoso a verde oscuro y, gota a gota, adquirió un color marrón con un leve matiz rojizo visible a contraluz.

La solución de dicromato se estandarizó realizando el mismo procedimiento, pero sin incluir la muestra de suelo, conocido como el blanco. En caso de que, tras la adición del dicromato y el ácido sulfúrico, la mezcla adquiriera un color azul intenso, esto indica que más del 75 % del dicromato ha sido reducido. En tal situación, fue necesario repetir el procedimiento utilizando una cantidad menor de muestra para obtener resultados más precisos.

5.3.2.5. Determinación de la textura del suelo

Con base en Klute A, (1986) El procedimiento comenzó con el secado de la muestra, seguido del moliendo y tamizado utilizando una malla de 2 mm. Posteriormente, se pesaron 60 gramos de la muestra y se colocaron en un horno durante 6 horas a una temperatura entre 75 y 80 °C. Una vez completado el secado, se esperó a que la muestra se enfriara; luego, se pesaron 50 gramos y se colocaron en un beaker de 250 ml. A continuación, se agregaron 100 ml de agua desionizada y 10 ml de hexametáfosfato de sodio, dejando la mezcla reposar en un frasco durante 12 horas.

Transcurrido este tiempo, la mezcla se agregó en vasos agitadores para desintegrar los agregados del suelo durante 10 minutos. Luego, se pasó la mezcla a un cilindro de vidrio aforado a 1000 ml, se introdujo el hidrómetro y se agregó agua hasta alcanzar la marca de 1000 ml. Posteriormente, se retiró el hidrómetro, se agitó vigorosamente el cilindro durante un minuto y, en caso de que este generara espuma, se utilizaba alcohol etílico para eliminarla. El cilindro se colocó sobre una superficie plana y estable, posteriormente, el hidrómetro se introdujo cuidadosamente en la suspensión y se registró la lectura a los 40 segundos. Tras esta medición, el hidrómetro se retiró y se enjuagó antes de cada lectura para evitar interferencias. A

continuación, se midió y se registró la temperatura de la suspensión utilizando un termómetro adecuado. Finalmente, dos horas después de los 40 segundos, se realizó una segunda lectura y se registró nuevamente la temperatura.

5.3.2.6. Variables evaluadas

5.3.2.6.1. pH.

En el ítem 5.3.2.5 se describe el procedimiento de la medición del pH del suelo haciendo uso de un pH-metro, se tomó en cuenta el dato de la última lectura.

5.3.2.6.2. Materia Orgánica

En cuanto al ítems 5.3.2.6 se encuentra el procedimiento para realizar materia orgánica y la fórmula que se utilizó para calcular fue:

$$\% \text{ Materia Organica} = \% \text{ Carbono Organico} \times 1.724$$

Donde; $(100 / 58 = 1.724)$ La materia organica tiene 58% de Carbono.

$$CO\% = \frac{(V_{\text{blanco}} - V_{\text{muestra}}) * M_{\text{Fe}2} + 0.003 * 100 * f}{w}$$

Donde:

CO% = porcentaje de carbono orgánico

Vblanco = volumen de titulante utilizado en el blanco, mL

Vmuestra= volumen de titulante utilizado en la muestra, mL

M Fe2+= concentración de solución estandarizada de FeSO4, molaridad

f = Factor de corrección, 1.3

W: Peso del suelo seco en gramos

5.3.2.6.3. Textura

Con respecto al ítems 5.3.2.7. se observa el procedimiento para hacer textura, en la cual se determinó el porcentaje de arena, limo y arcilla mediante las siguientes formulas:

$$\%Arena = 100 - \left[\left(\frac{1^{era}lectura\ corregida}{peso\ de\ la\ muestra} \right) \times 100 \right]$$

$$\%Arcilla = \left[\left(\frac{2^{da}lectura\ corregida}{peso\ de\ la\ muestra} \right) \right] \times 100$$

$$\%Limo = 100 - [\%Arena + \%Arcilla]$$

5.3.3. Fase III Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico, se aplicó una prueba de normalidad para determinar la distribución de las variables. En función del resultado de esta prueba, se emplearon métodos paramétricos (si los datos siguieron una distribución normal), utilizando la media y la desviación estándar para la descripción y análisis, o métodos no paramétricos (si los datos no se ajustaron a una distribución normal), utilizando los cuartiles (específicamente el cuartil 75) y el percentil 95 para describir la dispersión y tendencia de los datos. Además, se incorporaron técnicas multivariadas para integrar de forma conjunta la información de las variables edáficas y biológicas. Todas estas pruebas y análisis se llevaron a cabo utilizando el coeficiente de correlación de Pearson (r). y Microsoft Excel®. (Silverman *et al.*, 2024).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta y discuten de manera integrada, los resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo y la masa microbiana. En primera instancia, se describe el estado edáfico (pH, carbono orgánico, materia orgánica y textura) y seguidamente se analizan los valores de biomasa microbiana y su vínculo con dichas propiedades. Este enfoque permite interpretar la actividad microbiana dentro del contexto del ambiente del suelo estudiado.

6.1 Prueba de Normalidad

La Tabla 1 Presenta los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk, aplicada a las variables fisicoquímicas y biológicas del suelo evaluadas en la microcuenca del río Talgua (n=77). Esta prueba es adecuada para el tamaño muestral utilizado y permite identificar desviaciones respecto a la distribución normal. Los resultados muestran variables pH ($p = 0.003$), carbono orgánico ($p < 0.001$), materia orgánica ($p < 0.001$), limo ($p = 0.011$), arcilla ($p = 0.007$) y masa microbiana del suelo, MMS ($p < 0.001$) presentan valores de p inferiores al nivel de significancia $\alpha = 0.05$; por tanto, se concluye que no siguen una distribución normal. Estas variables muestran asimetrías, lo cual es común en datos ecológicos, especialmente en propiedades del suelo influenciadas por factores como la materia orgánica, la textura o la actividad microbiana, que suelen presentar comportamientos no lineales o heterogéneos. (Prajuli *et al.* 2025)

Por otra parte, las variables arena ($p = 0.631$) y humedad ($p = 0.275$) presentan valores de p superiores a 0.05, por lo que se acepta la hipótesis de normalidad, asumiendo que sus distribuciones no difieren significativamente de una distribución normal. Este comportamiento puede explicarse porque ambas variables tienden a estar determinadas por procesos más estables y homogéneos en suelos vírgenes, donde la textura arenosa se distribuye de forma relativamente uniforme y la humedad mantiene estabilidad por la cobertura vegetal permanente. En conjunto,

estos resultados justifican el uso de estadística no paramétrica para los análisis correlacionales posteriores (Spearman Análisis de Componentes Principales (ACP)) y el análisis jerárquico, ampliamente recomendados cuando los supuestos de normalidad no se cumplen. (Hydbom 2024)

Tabla 1 Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a variables fisicoquímicas y biológicas del suelo en la Microcuenca del Rio Talgua.

Variable	N	W	p-valor	Conclusión ($\alpha=0.05$)
pH	77	0.947	0.003	No normal
CO*	77	0.926	<.001	No normal
MO*	77	0.926	<.001	No normal
Arena	77	0.987	0.631	Se asume normal
Limo	77	0.957	0.011	No normal
Arcilla	77	0.954	0.007	No normal
Humedad	77	0.98	0.275	Se asume normal
MMS*	77	0.908	<.001	No normal

*MMS = Masa Microbiana del Suelo*CO= Carbono Organico *MO=Materia Organica

6.2 Caracterización fisicoquímica del suelo.

6.2.1. Variabilidad del pH del suelo.

La figura 1 representa la distribución de pH de los suelos analizados en las comunidades de Buena Vista, Pinabetal, Flor del Café y Quebrada de Agua en la microcuenca del río Talgua. En total se obtuvieron 77 muestras, cuyos valores fluctuaron entre 4.89 y 8.24, con una media de 6.68 y una mediana de 6.87. El rango intercuartílico fue de 1.33, lo que refleja una diferencia moderada entre las muestras. La curva de densidad evidencia una distribución asimétrica con la mayor concentración de valores entre un pH de 6.5 y 7.5, rango considerado ligeramente ácido a neutro.

Estos resultados evidencian que la mayoría de los suelos muestreados presentan condiciones químicas favorables para la actividad microbiana, al situarse en el rango óptimo para la disponibilidad y estabilidad biológica de los nutrientes del suelo FAO (2017).Únicamente,

algunas muestras se localizaron en los valores más ácidos del rango (<5.5) o alcalinos (<8.0) lo que podría estar asociado a condiciones específicas del lugar y a variaciones en la materia orgánica o textura del suelo. (Iniestra *et al.* 2013)

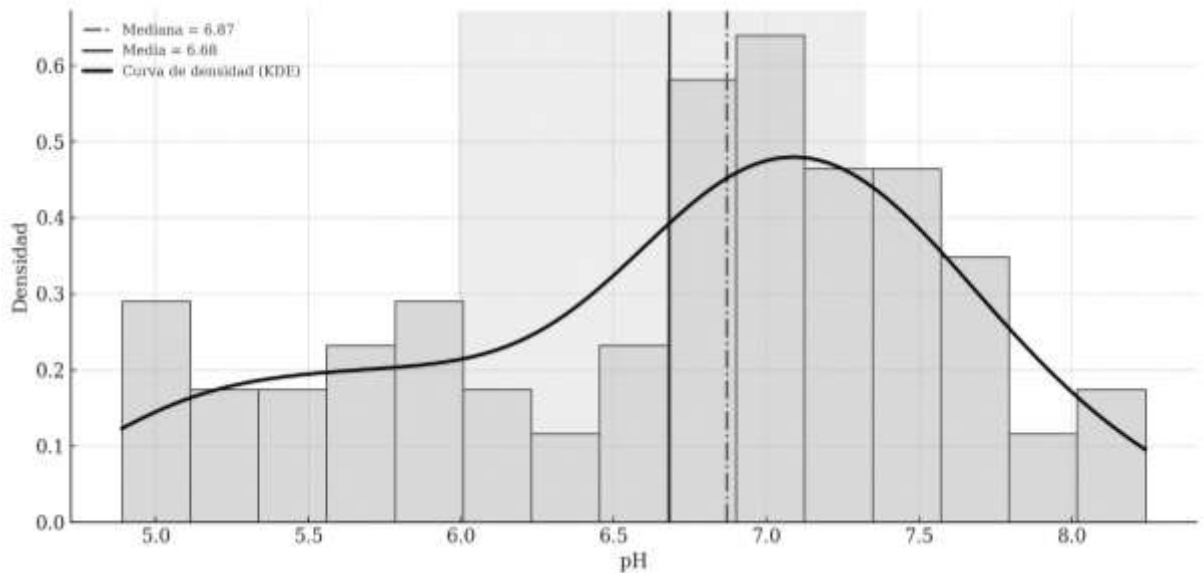


Figura 1 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los valores de pH en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

El pH del suelo es uno de los principales componentes que conforman y condicionan la estructura y funcionamiento de la comunidad microbiana debido a que influye directamente en la disponibilidad de nutrientes, la actividad enzimática y la integración de microorganismos. En estudios realizados por Chen y He (2004), se encontró que la biomasa microbiana muestra una tendencia a alcanzar un punto máximo en suelos con pH entre 6.5 y 7.5, disminuyendo de manera notable cuando se torna más ácido o más alcalino. La forma unimodal observada en la figura confirma esta tendencia, puesto que el pico de densidad se encuentra justamente en torno al pH 7

Finalmente, Martínez *et al.* (2018) destacan que un pH equilibrado en suelos sin intervención humana promueva la conservación de la biodiversidad microbiana y la sostenibilidad del sistema edáfico. De modo que se puede concluir que los valores de pH observados en la microcuenca representan condiciones químicas ideales para el mantenimiento de una alta masa

microbiana, lo cual equivale a un parámetro de referencia para futuras investigaciones en suelos vírgenes de la región.

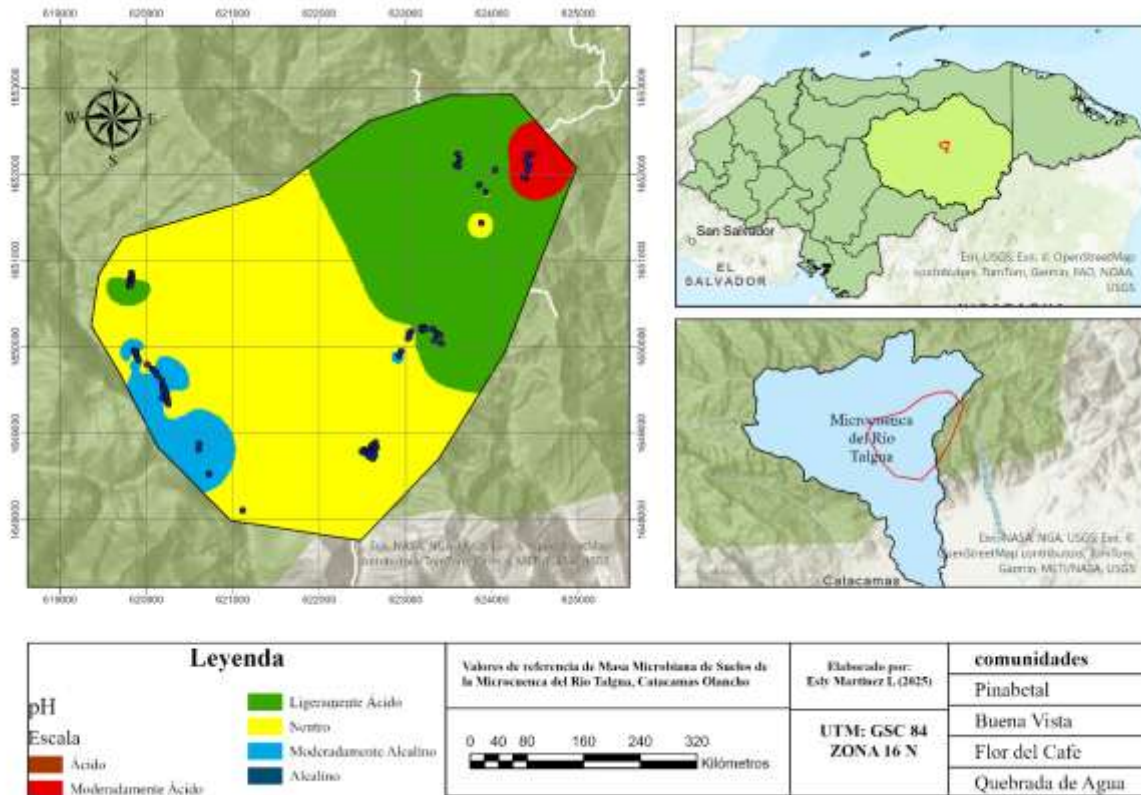


Figura 2 Mapa de distribución espacial del pH en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua.

El mapa de pH de los suelos de las comunidades Buena Vista, Pínabetal, Flor del Café y Quebrada de Agua muestra una variabilidad espacial moderada, con valores que se distribuyen principalmente entre rangos ligeramente ácidos, neutros y moderadamente alcalinos. La mayor parte del área se clasifica como neutra a ligeramente alcalina, condición que favorece la disponibilidad de la mayoría de nutrientes y el desarrollo de una microbiota activa (Brandy y Weil 2017)

6.2.2. Variabilidad del Carbono Orgánico del Suelo

Tal como se observa en la Figura 3, la distribución de los porcentajes de carbono orgánico (CO) de los suelos sin intervención humana evaluados, los valores oscilaron entre 0.9% y 15.08% con una media de 5.26% y una mediana de 5.10% en un rango intercuartílico de 2.08 a diferencia de ello, la desviación estándar fue de 2.16 lo que indica una variabilidad moderada entre los sitios muestreados.

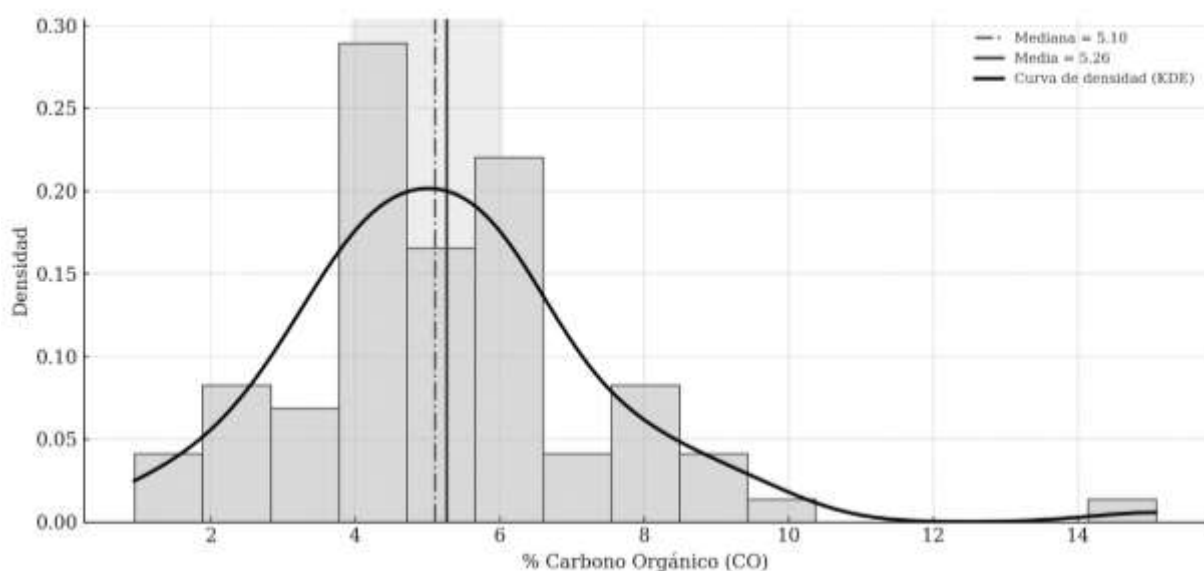


Figura 3 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de carbono orgánico en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

En la curva de densidad se observa una distribución asimétrica positiva, donde la mayor parte de las muestras se concentran entre 3 y 7% de carbono orgánico a diferencia de otros suelos que muestran valores por encima del 10%. Este comportamiento sugiere que los suelos vírgenes de los sitios muestreados mantienen una reserva orgánica promedio adecuada, aunque con algunas áreas de mayor acumulación de materia orgánica, probablemente asociada a una mayor cobertura vegetal o menor disturbio antrópico, (Iniestra *et al.* 2013)

El carbono orgánico es uno de los principales factores para el funcionamiento biológico del ecosistema, ya que refleja la principal fuente de energía y carbono para la masa microbiana.

Martínez *et al.* (2018) menciona que los suelos con elevados niveles de carbono orgánico poseen mayor eficiencia para sostener comunidades microbianas diversas y activas . Esto se debe a la constante disponibilidad de sustratos fácilmente degradables. Este carbono orgánico inestable regula la actividad y renovación microbiana, logrando alcanzar hasta un 5% del carbono total del suelo bajo condiciones óptimas.

En los suelos vírgenes evaluados la media es de CO fue de 5.26% lo que refleja una reserva orgánica adecuada para mantener una biomasa activa. Resultados similares fueron encontrados por Zhou *et al.* (2015), quienes observaron que los ecosistemas naturales con una presencia vegetal significativa presentan una correlación positiva entre el CO y la biomasa microbiana. También demostraron que esta relación está asociado con las condiciones climáticas y los recusos edáficos, destacando que el carbono orgánico y la biomasa microbiana están estrechamente ligados en suelos no perturbados.

Por tanto, los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que los suelos vírgenes de la microcuenca del río talgua poseen condiciones favorables para la conservación del carbono orgánico y la masa microbiana, manteniendo un balance natural entre la descomposición y la formación de materia orgánica estable. Este equilibrio muestra la alta calidad biológica y ecológica de los suelos estudiados, lo que los convierte en una referencia útil para comparaciones de suelos agrícolas o con intervención humana en la región.

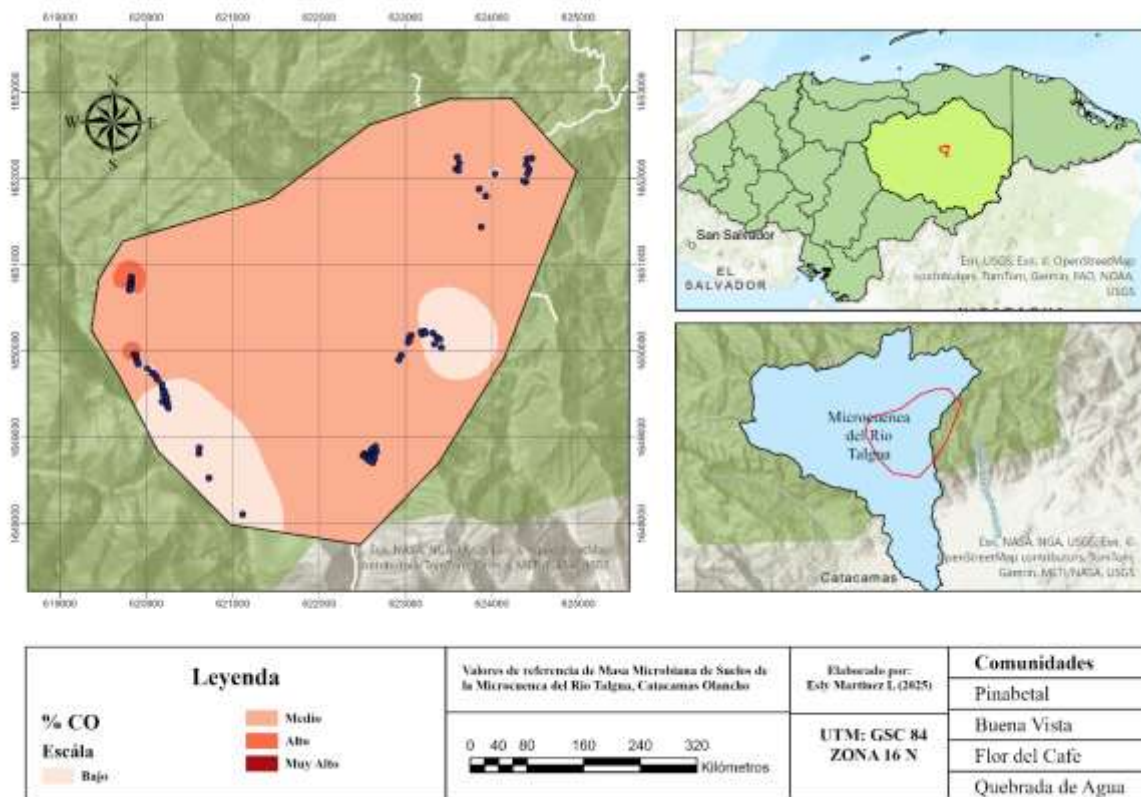


Figura 4 Mapa de distribución espacial de los porcentajes de carbono orgánico en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

El mapa de carbono orgánico de las comunidades de Buena Vista, Pinabetal, Flor de Café y Quebrada de Agua evidencia una variabilidad clara, con valores que se distribuyen entre los rangos bajo, medio, alto y muy alto. La mayor parte del territorio se clasifica dentro de los rangos bajos y medios, lo que indica una moderada acumulación de materia orgánica. Los suelos identificados con valores altos o muy altos se localizan en áreas específicas donde la cobertura vegetal es más densa favoreciendo el enriquecimiento del carbono edáfico. Estos patrones son consistentes con lo señalado por Brandy y Weil (2017), quienes confirman que la distribución del carbono orgánico depende fuertemente de la vegetación.

6.2.3. Variabilidad de la Materia Orgánica del Suelo.

Tal como se aprecia en la Figura 5, se muestra la distribución porcentual de materia orgánica en suelos vírgenes muestreados de la microcuenca del río Talgua. Los valores variaron entre los 1.61% y 26.00% con una media de 9.06% y una mediana de 8.79%; y el rango intercuartílico fue de 3.59, a diferencia de la desviación estándar que alcanzó 3.73, mostrando una heterogeneidad moderada entre los sitios evaluados.

La curva de densidad muestra una distribución unimodal moderadamente desviada hacia valores altos, donde la mayor proporción de muestras se ubica entre 5% y 15% de MO; únicamente algunos puntos alcanzan niveles superiores al 20%, lo que puede deberse a sitios con poca exposición a la oxidación (Brandy y Weil 2016). En general los resultados reflejan que los suelos vírgenes conservan una reserva orgánica considerable, propia de ecosistemas con densa cobertura vegetal.

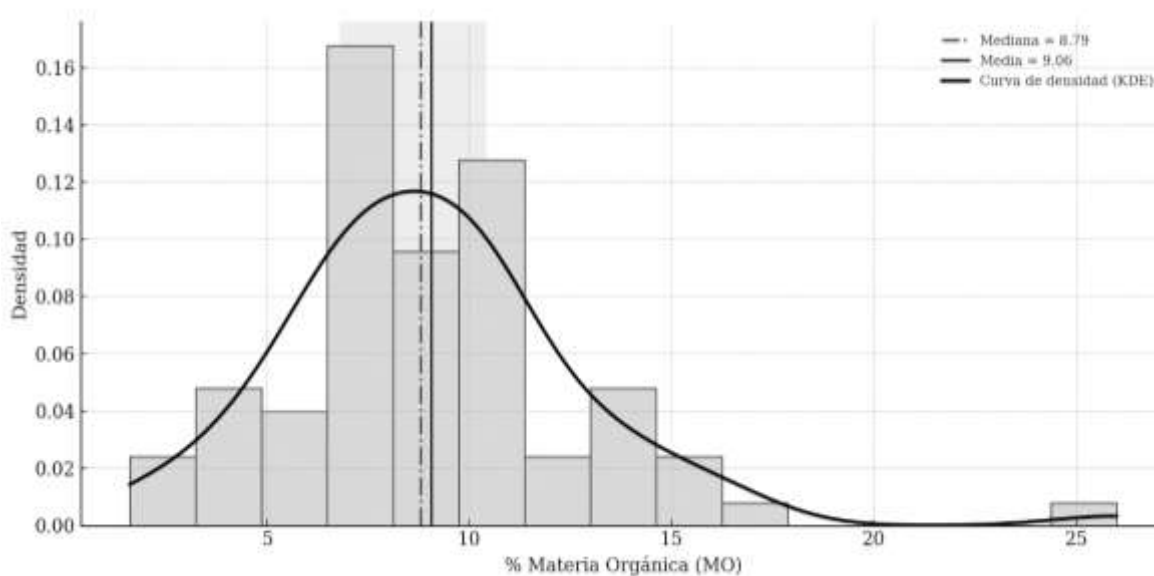


Figura 5 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de materia orgánica en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

La materia orgánica del suelo constituye uno de los factores más representativos de la calidad y vitalidad del suelo, al actuar directamente en la estructura del suelo, la disponibilidad de

nutrientes y las actividades biológicas. Con base en Brookes et al. (2001) la fracción microbiana que esta activa presenta entre 1% y 4% de la MO total y se considera responsable de las principales transformaciones bioquímicas del carbono, nitrógeno y fósforo, siendo fundamental para la dinámica de recolección de nutrientes y estabilidad del ecosistema.

En el contexto de los suelos vírgenes del estudio realizado, la predominancia de contenidos medios-altos de materia orgánica indica condiciones edáficas balanceadas, donde los aportes de hojarasca y raíces se transforman progresivamente en compuestos orgánicos estables. Tal como plantea Kabelka et al.(2025), quienes enfatizan que la calidad de la materia orgánica, expresada en la composición relativa de las fracciones lábiles y recalcitrantes, determina la eficiencia metabólica de la biomasa microbiana y la capacidad del suelo para almacenar carbono a largo plazo.

Por ende, los resultados demuestran que la materia orgánica de los suelos vírgenes de la microcuenca del río Talgua mantiene un equilibrio entre descomposición y acumulación, demostrando así niveles altos de sostenibilidad biológica y durabilidad ecológica. Estos valores se pueden considerar referenciales para estos ecosistemas, donde la interacción entre la cobertura vegetal, la humedad y la microbiota del suelo garantiza un proceso edáfico sostenible.

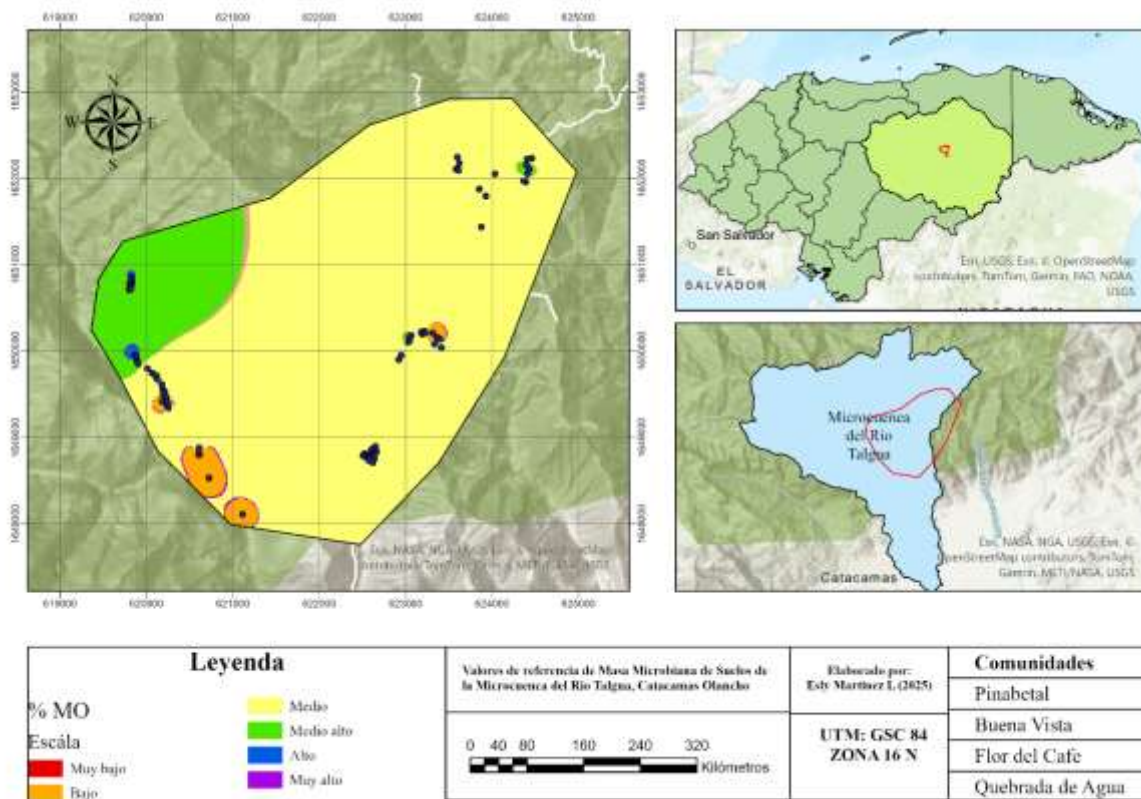


Figura 6 Mapa de distribución espacial de los porcentajes de materia orgánica en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

El mapa de materia orgánica de las comunidades de Buena Vista, Pinabetal, Flor de Café y Quebrada de Agua muestra una varabilidad, con predominio de valores en los rangos medios, lo cual indica un aporte orgánico constante y típico de suelos vírgenes con cobertura vegetal estable. Los sitios clasificados como medio alto y alto o muy alto se distribuyen de manera puntual, por otro lado los rangos muy bajos o bajos se localizan únicamente en pequeñas áreas, esto asociadas a ambientes más expuestos, con menor cobertura o mayor drenaje superficial. (Brandy y Weil 2017)

6.2.4 Porcentaje de Arena

Según se aprecia en la Figura 8, se muestra la distribución porcentual de arena en los suelos

vírgenes evaluados. Los valores variaron entre 52.80% y 86.80 %, con una media de 70.90% y una mediana de 70.80% reflejando una tendencia esencial muy próxima entre ambas medidas, el rango intercuartílico fue de 8.00 con una desviación estándar de 7.18, lo que demuestra una variación moderada en el contenido de arena entre las muestras analizadas.

La curva de densidad muestra una distribución unimodal y aproximadamente simétrica, con el mayor número de muestras situadas en el rango de entre 65% y 75% de arena, lo que representa a la mayoría de los suelos de la microcuenca como francos arenosos. Este tipo de textura favorece un drenaje eficiente y una adecuada aireación, condiciones usuales de suelos naturales. (USDA,2016)

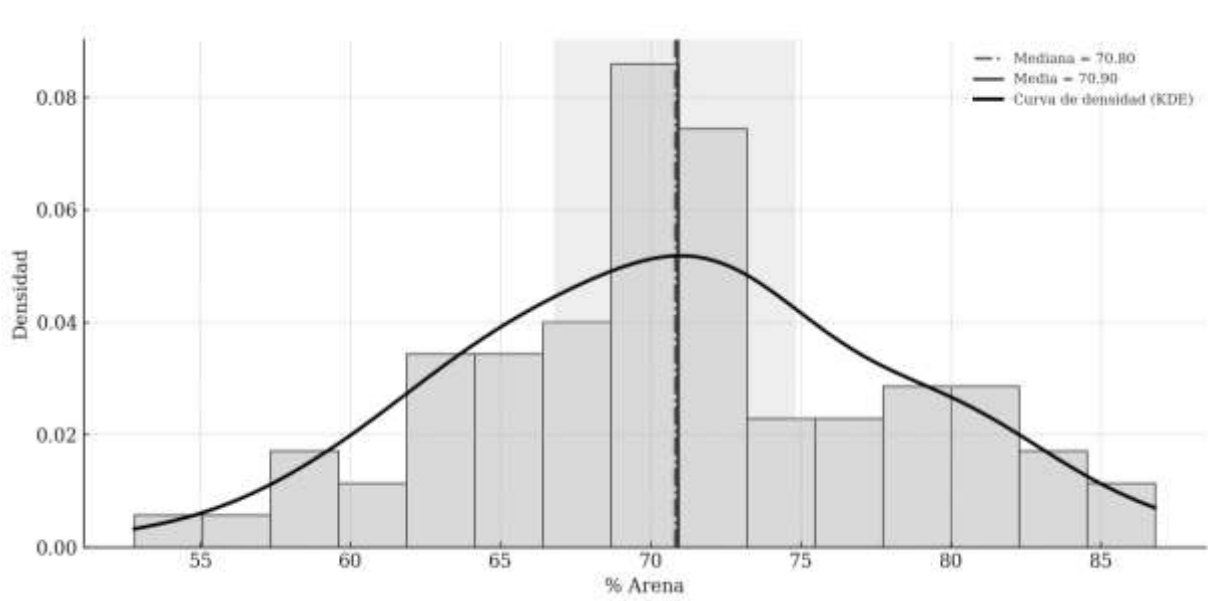


Figura 7 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de arena en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

En investigaciones como la de M. Vogel y Below. (2018), se registró que los suelos franco-arenosos presentan una elevada tasa de respiración microbiana cuando hay suficiente materia orgánica presente, pero la biomasa disminuye en condiciones de baja humedad o poco carbono. La limitada capacidad de retención de las fracciones de textura gruesa acelera la mineralización del carbono, reduciendo así su potencial de almacenamiento estable en el suelo.

Por otro lado, Bautista y Aguilera (2023) demuestran que la textura arenosa del suelo fomenta una estructura edáfica más suelta permitiendo una mayor difusión de oxígeno y una significativa actividad microbiana aeróbica, pero con menor capacidad de retener agua y nutrientes. En suelos sin intervención humana, donde hay una alta cobertura vegetal que contribuye continuamente con residuos orgánicos, este tipo de textura ayuda a mantener un balance entre descomposición y acumulación de carbono.

En cuanto a los suelos vírgenes de la microcuenca, estos indican condiciones naturales de buena aireación y drenaje lo que favorece la respiración microbiana y la mineralización de nutrientes, siempre y cuando la materia orgánica y la humedad se mantenga adecuadas (FAO,2017). Este balance genera un entorno estable para la biomasa microbiana, lo cual demuestra la elevada calidad biológica y ecológica de estos suelos. Así el porcentaje de arena observado puede considerarse un valor característico de los suelos vírgenes de la región y un referente físico de soporte para lo que es la masa microbiana.

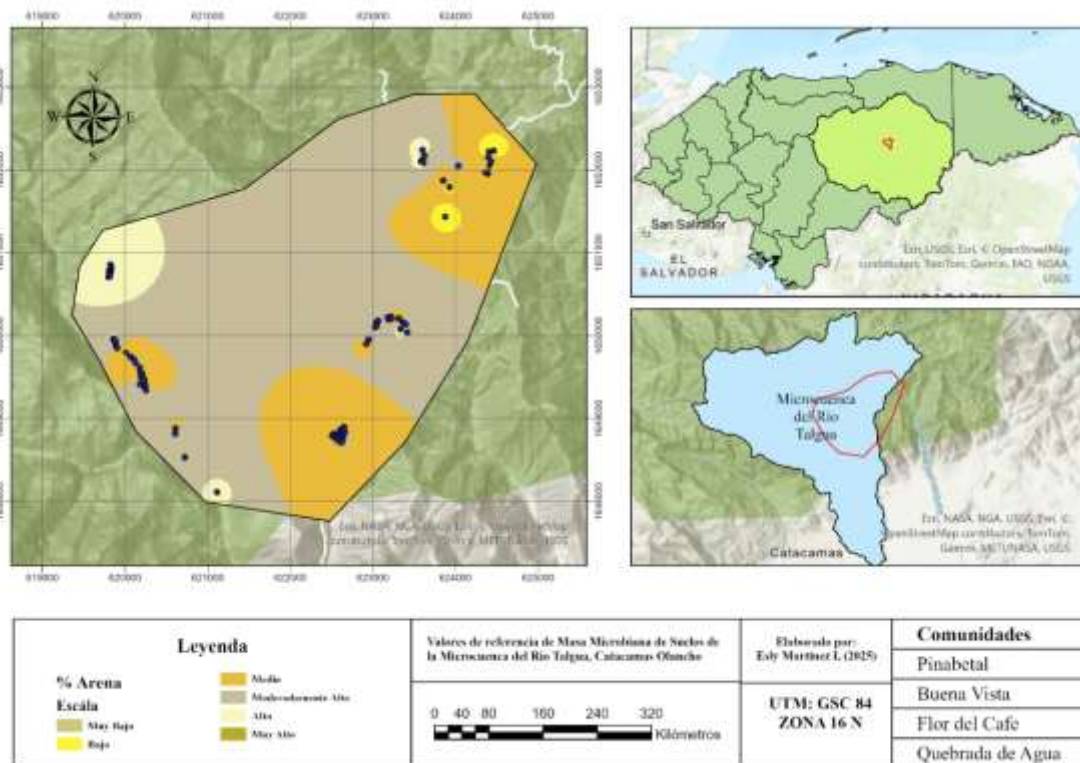


Figura 8 Mapa de distribución espacial de porcentajes de arena en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

6.2.5 Porcentaje de limo

El gráfico de la Figura 9, presenta la distribución del porcentaje de limo de las muestras de suelos de la microcuenca donde los valores oscilaron entre 4.00% y 20.00% con una media de 12.73% y una mediana de 12.00% lo que demuestra una leve tendencia hacia valores intermedios. El rango intercuartílico fue de 6.00 y la desviación estándar de 3.71, indicando una variabilidad moderada entre los sitios muestreados. La curva de densidad muestra una distribución amplia con varios picos leves, donde la mayoría de las muestras se concentran entre 10% y 15% de limo, mientras que los valores extremos representan una minoría. En general los suelos analizados presentan texturas franco-arenosas con proporciones moderadas de limo, que contribuyen al equilibrio entre retención de humedad y aireación.

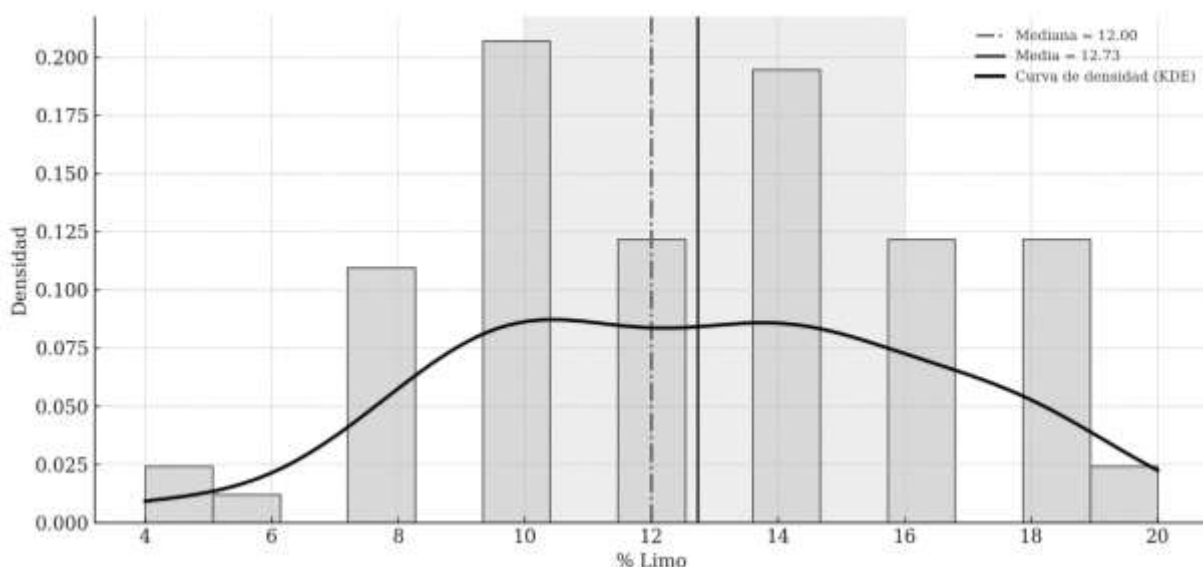


Figura 9 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de limo en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

De acuerdo con, Mario Raudes y Norman Sagastume (2009), se evidencia que las fracciones finas del suelo son las encargadas de proteger físicamente la materia orgánica al retenerla dentro de agregados, reduciendo su exposición a la descomposición microbiana rápida. Este proceso justifica por qué los suelos con contenido intermedio de limo generalmente mantienen niveles más altos de carbono orgánico estable y, por ende, una biomasa microbiana sostenible.

Por su parte Bautista y Aguilera (2023), demuestran que el contenido de limo beneficia la formación de estructuras consolidadas al interactuar con el carbono orgánico y coloides del suelo. Estos agregados proporcionan micro hábitats con condiciones idóneas de humedad y protección física para la biomasa microbiana, permitiendo la coexistencia de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos.

Los resultados de esta investigación, con una media de 12.73% de limo, reflejan condiciones físicas equilibradas ya que la fracción limosa no es dominante, pero sí es lo suficientemente importante para mejorar la cohesión de los agregados y la retención de agua útil. Esta proporción intermedia se considera ideal en suelos vírgenes donde la cobertura vegetal y el contenido de materia orgánica interactúan para mantener su entorno biológico activo y estructuralmente estable. FAO (2017) Por lo tanto, el porcentaje de limo encontrado en los suelos sin intervención humana de la microcuenca del río Talgua puede considerarse característico de suelos saludables con una excelente capacidad de almacenamiento hídrico y estabilidad física para mantener una masa microbiana activa y sostenible.

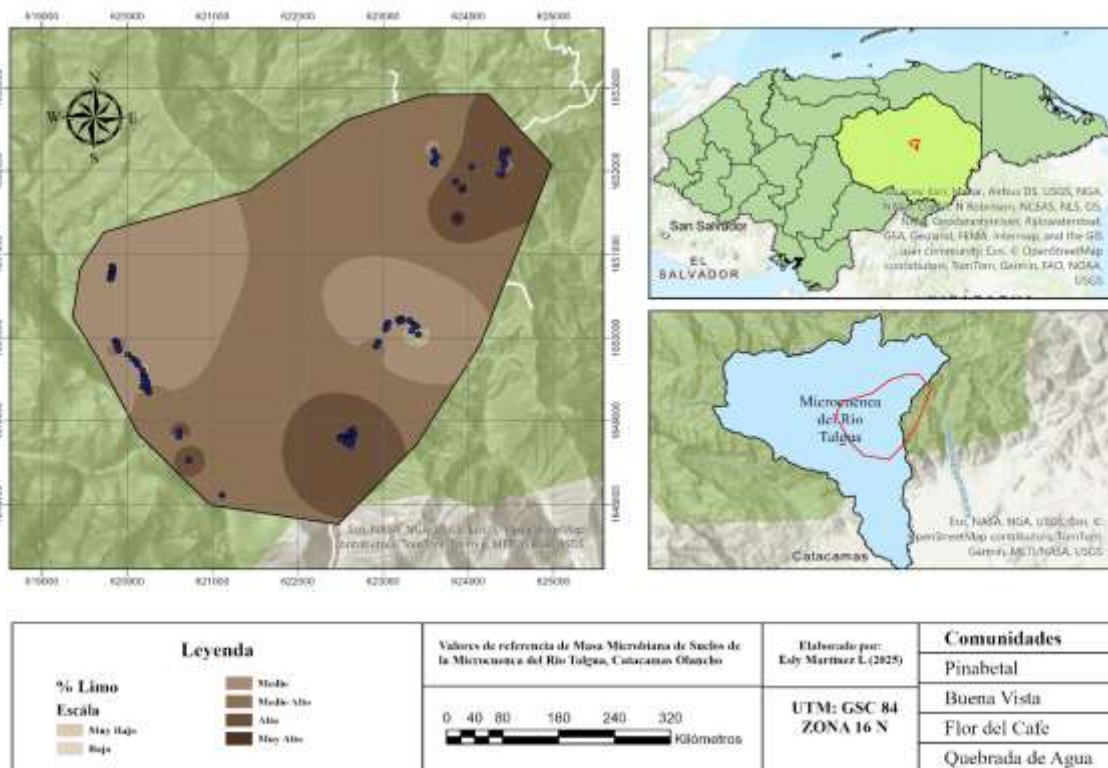


Figura 10 Mapa de distribución espacial de los porcentajes de limo en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

El mapa figura 10 de porcentaje de limo de las comunidades de Buena Vista, Pinabetal, Flor de Café y Quebrada de Agua, se caracteriza por contenidos medios y medios altos lo que indica suelos con texturas franco-arenosas moderadamente desarrolladas, los sitios clasificados como altos o muy altos se concentran en sectores reducidos donde la pendiente es menor y los rangos bajos o muy bajos se restringen áreas localizadas donde predominan materiales más gruesos.

6.2.6. Porcentaje de arcilla.

Al analizar la figura 11, se aprecia que el porcentaje de arcilla en los suelos no perturbados de los diferentes sitios de muestreo, varió entre 5.20% y 37.20% con una media de 16.37% y una mediana de 17.20%, lo que indica una leve tendencia hacia contenidos medios de arcilla. El rango intercuartílico fue de 6.00, mientras que la desviación estándar fue de 5.35, indicando una variabilidad moderada entre los sitios de muestreo.

La curva de densidad presenta una sola concentración de valores levemente hacia la derecha donde la mayor parte de las muestras se centran entre 13% y 20% de arcilla, con valores extremos poco frecuentes al 30%. De manera integral estos resultados caracterizan a las muestras analizadas como franco arenoso arcillosos, Según (USDA 2016) estas texturas son comunes en suelos tropicales conservados que combinan con una buena oxigenación del suelo con una adecuada capacidad de retención de agua y nutrientes.

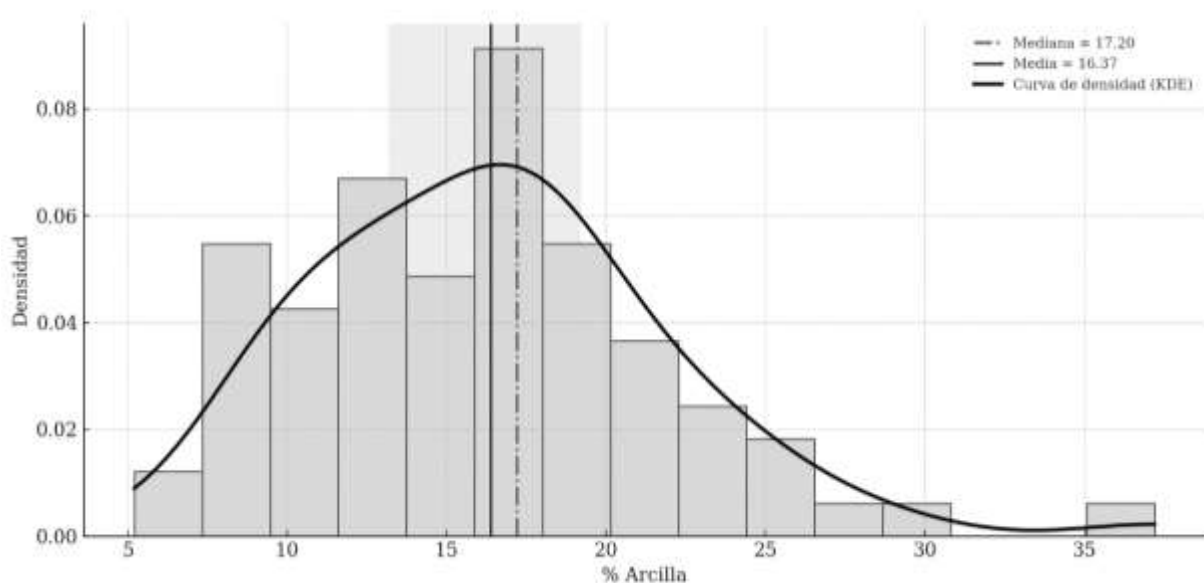


Figura 11 Distribución de frecuencia y curva de densidad de los porcentajes de arcilla en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

Según Bernal *et al.* (2018), la fracción fina del suelo específicamente la arcilla juega un papel crucial en la estabilización del carbono edáfico, al formar complejos órgano-minerales que limitan el acceso de los microorganismos al carbono lábil. Estos complejos lo protegen físicamente lo cual explica por qué los suelos con proporciones moderadas de arcilla mantienen una biomasa microbiana más estable y eficiente, incluso bajo condiciones climáticas variables.

Asimismo, Vogel y Below (2018) demuestran en su investigación que existe una asociación directa entre el contenido arcilloso y la cantidad de carbono protegido del suelo. Según estos resultados, por cada aumento del 10% en arcilla aumenta significativamente la capacidad del

suelo para almacenar carbono orgánico estable, lo que favorece a una mayor resiliencia microbiana. Sin embargo, cuando su proporción es excesiva esto puede limitar la aireación y reducir la masa microbiana por eso las texturas equilibradas como las que se observan en este estudio permiten mantener una actividad microbiana sostenible.

En esta investigación, la media de 16.37% de arcilla evidencia un equilibrio edáfico favorable para la biomasa microbiana, aportando una base mineral estable que ayuda a preservar el carbono orgánico, retener humedad y sostener una comunidad microbiana activa. De forma conjunta se refleja un sistema edáfico funcionalmente equilibrado, en el que la textura moderadamente arcillosa contribuye a una excelente estabilidad estructural, la retención hídrica y la persistencia de carbono microbiano considerados factores fundamentales para la calidad del suelo.(Rumpelt.*et al.*2025).

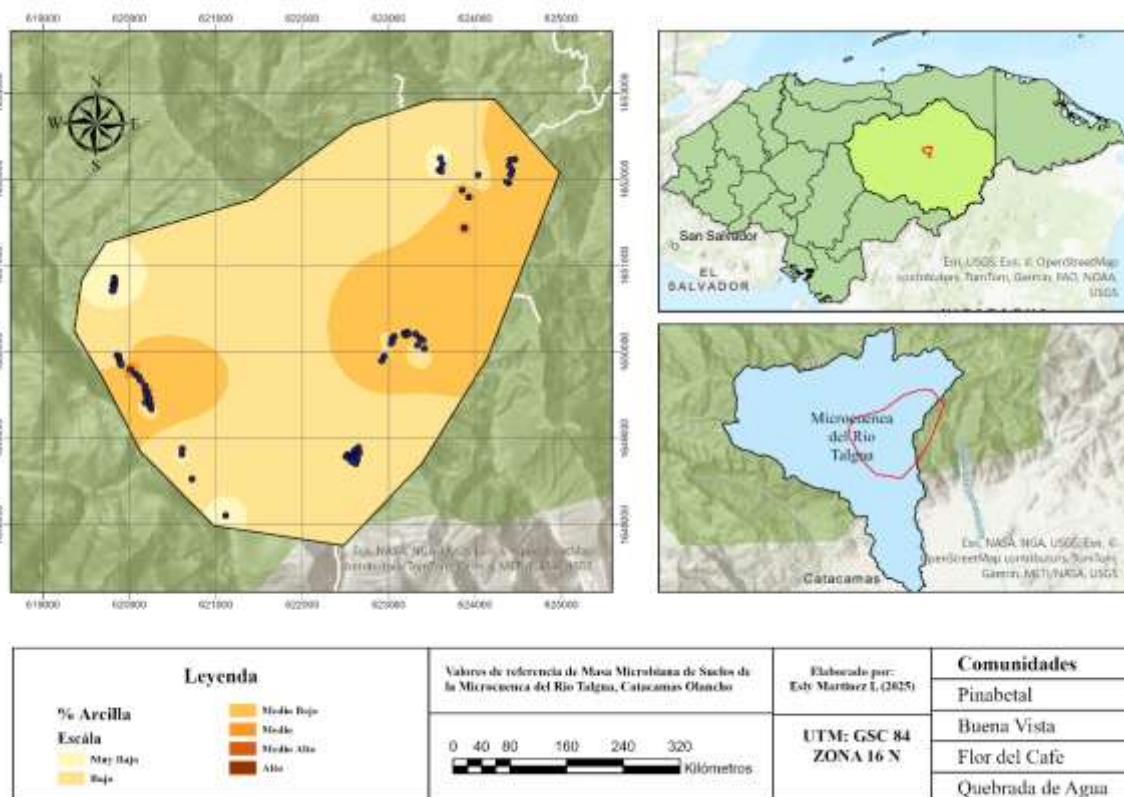


Figura 12 Distribución espacial de los porcentajes de arcilla en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

El mapa Figura 12 del porcentaje de arcilla en las comunidades de Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, muestra que gran parte de la microcuenca presenta valores medio-bajos y medios, lo que indica suelos con una fracción fina moderada y características propias de texturas franco-arenosas a franco-limosas. Las zonas con contenido medio alto o alto de arcilla aparecen únicamente en áreas puntuales, particularmente en el sector norte y suroeste, donde la menor pendiente y la acumulación de sedimentos favorecen la presencia de partículas más finas. Por su parte, los rangos muy bajos y bajos se distribuyen en pequeñas áreas donde predominan materiales gruesos, asociados al material parental. Este comportamiento concuerda con lo planteado por Hillel (2004), quien explica que la arcilla tiende a concentrarse en posiciones donde el escurrimiento es más lento y la erosión es menor, mientras disminuye en zonas más expuestas o de mayor pendiente. La distribución observada sugiere que la microcuenca mantiene una textura equilibrada que contribuye a la retención de agua, la formación de agregados y la estabilidad estructural del suelo. (Matus 2021)

6.3 Variabilidad de la Masa Microbiana del Suelo.

La Figura 13 demuestra la distribución de la masa microbiana del suelo, formulada en miligramos de carbono microbiano por kilogramo de suelo. Los valores recolectados en 77 sitios de muestreo variaron entre 630,52 y 4140,66 mgC/kg, con una media de 1692,09mgC/kg y una mediana de 1476,80 mgC/kg con un rango intercuartílico de 989.65 y la desviación estándar fue de 799.16 esto refleja una moderada dispersión de los datos, atribuible a la heterogeneidad natural de los suelos vírgenes en cuanto a humedad, contenido de materia orgánica y textura.

La curva de densidad muestra una asimetría positiva, lo que pone en evidencia que la mayoría de los valores se concentraron en el rango de 1000 a 2000mgC/kg, mientras que pocos suelos alcanzaron valores superiores a 3000 mgC/kg. Este comportamiento indica que la mayoría de los sitios presentan una biomasa microbiana moderadamente alta, característica de suelos no perturbados con una excelente disponibilidad de carbono orgánico y humedad estable (FAO,2020).

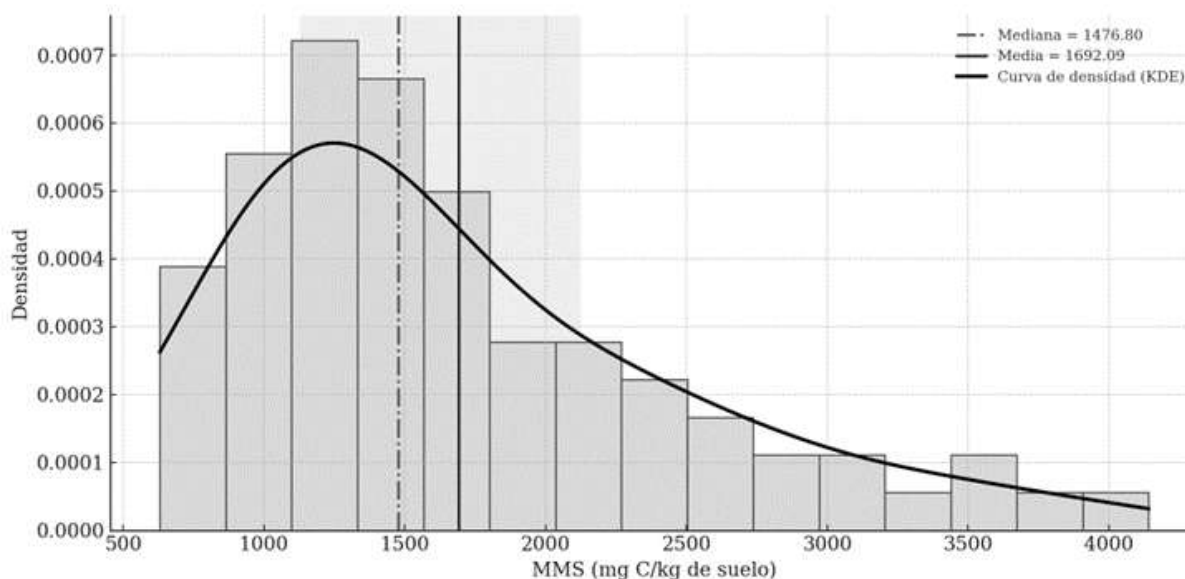


Figura 13 Distribución de frecuencia y curva de densidad de la masa microbiana del suelo en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

Los resultados de la masa microbiana constituyen el centro biológico de la evaluación edáfica realizada ya que integran el efecto de múltiples factores físicos y químicos del suelo, incluyendo el pH, la materia orgánica y la textura. La media general de 1692.09 mgC/kg demuestra una elevada actividad metabólica microbiana, coherente con las condiciones de suelo virgen, cobertura vegetal permanente y mínima perturbación antrópica observada en las diferentes comunidades de la microcuenca. (FAO,2017).

Asimismo, Paolini Gómez (2018) destaca que la masa microbiana es un indicador sensible de la calidad biológica del suelo, ya que responde rápidamente a los cambios en el contenido de carbono orgánico y humedad. En este estudio, la valoración positiva observada entre masa microbiana, materia orgánica y carbono orgánicos confirma que la disponibilidad de sustratos orgánicos y agua son los principales factores que controlan la actividad microbiana en estos suelos.

De acuerdo con Anderson y Domsch (2010) los suelos con valores de masa microbiana

superiores a 1000 mgC/kg se consideran biológicamente activos, por el contrario, valores menores a 500 mgC/kg corresponden a suelos degradados o empobrecidos. En este sentido, los valores obtenidos evidencian un equilibrio ecológico favorable.

La magnitud de los valores registrados también es comparable con estudios realizados en ecosistemas tropicales conservados, como los reportados por (Biomasa microbiana del suelo y respiración 2022) en bosques húmedos (rango 1200–3500 mg C/kg), y por Insam (1990) en suelos forestales europeos (rango 900–2500 mg C/kg). Estos rangos se asocian con suelos estructuralmente estables y con alta capacidad de autorregulación biológica.

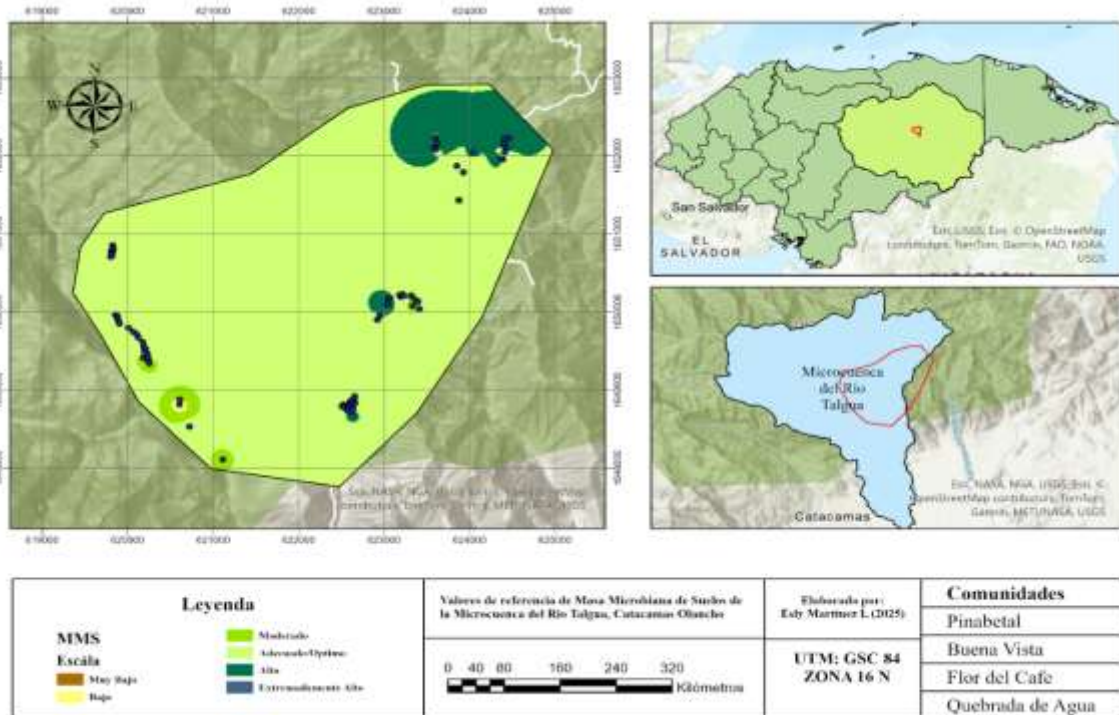


Figura 14 Mapa de distribución espacial de la masa microbiana del suelo en suelos vírgenes de las comunidades Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, microcuenca del río Talgua, Catacamas, Olancho.

En síntesis, los resultados evidencian que la masa microbiana del suelo en los ecosistemas sin intervención humana de las comunidades de la microcuenca constituye un indicador cuantitativo de la calidad biológica al reflejar la interacción adecuada entre las variables físicas y químicas. La alta masa microbiana del suelo observada confirma la integridad funcional de los suelos

naturales y su papel clave en la estabilidad ambiental.

El mapa de masa microbiana del suelo (MMS) en las comunidades de Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua evidencia que la mayor parte de la microcuenca se encuentra en un rango adecuado a moderado, reflejando suelos con una actividad biológica estable y típica de ecosistemas poco perturbados. Las zonas donde la MMS alcanza valores altos y extremadamente altos, principalmente en sectores del norte y puntos aislados en el sur, coinciden con áreas de mayor cobertura vegetal y mayor contenido de materia orgánica, condiciones que suelen favorecer la proliferación microbiana. En contraste, los sitios clasificados como bajos o muy bajos aparecen de forma puntual, posiblemente asociados a microambientes más secos, suelos más arenosos o menor aporte de residuos orgánicos. Esta distribución concuerda con lo señalado por Anderson y Domsch (2010), quienes destacan que la biomasa microbiana es altamente sensible a la disponibilidad de carbono, la humedad y la estabilidad del ecosistema, siendo mayor en suelos bien conservados y con cobertura permanente.

6.3.1 Interpretación ecológica del suelo

Con base en los resultados obtenidos y en el análisis por percentiles y cuartiles, se definieron cinco rangos ecológicos para interpretar la masa microbiana del suelo (MMS) en función de su funcionamiento biológico. Estos rangos fueron clasificados como: muy bajo (< 735.68 mg C/kg de suelo), bajo (735.68–907.59 mg C/kg), moderado (907.59–1129.52 mg C/kg), adecuado u óptimo (1129.52–2119.16 mg C/kg) y alto a extremadamente alto (> 2119.16 mg C/kg de suelo). Cada categoría representa un nivel distinto de actividad y equilibrio microbiano, permitiendo interpretar el estado ecológico del suelo y su capacidad para sostener procesos biológicos clave como la descomposición de residuos y el reciclaje de nutrientes (Anderson & Domsch, 2010).

Tabla 2 Interpretación ecológica del estado del suelo en la Microcuenca del Río Talgua.

Categoría ecológica de MMS	Rango (mg C/kg suelo)	Interpretación ecológica del estado del suelo
Muy Bajo	< 735.68	Indica sitios con actividad microbiana limitada, asociados con menor disponibilidad de humedad, carbono orgánico o condiciones texturales menos favorables para el desarrollo biológico del suelo.
Bajo	735.68 – 907.59	Refleja una actividad microbiana reducida, vinculada a limitaciones locales de sustrato orgánico, humedad o menor estabilidad edáfica
Moderado	907.59 – 1129.52	Representa una actividad microbiana intermedia, propia de suelos con condiciones edáficas funcionales, pero con menor expresión biológica que los sitios más favorables
Adecuado / Óptimo	1129.52 – 2119.16	Indica condiciones favorables para el desarrollo microbiano, asociadas a adecuadas disponibilidad de carbono orgánico, humedad y equilibrio textural
Alto	2119.16 – 3310.89	Refleja una elevada actividad microbiana, vinculada con mayor acumulación de materia orgánica, buena humedad y condiciones edáficas estables
Extremadamente alto	> 3310.89	Indica microambientes excepcionalmente favorables ,con alta disponibilidad de sustratos orgánicos, mayor actividad radicular y condiciones óptimas para la biomasa microbiana.

En la microcuenca del río Talgua, la mayor proporción de los valores de MMS se concentró en los rangos moderado y adecuado/óptimo, lo que indica que los suelos evaluados presentan un funcionamiento biológico favorable, característico de ecosistemas poco perturbados y con adecuada disponibilidad de carbono orgánico y humedad. La presencia de valores altos y extremadamente altos puede asociarse a microambientes con mayor acumulación de residuos orgánicos, mayor actividad radicular y condiciones edáficas especialmente favorables para la biomasa microbiana. En contraste, los valores muy bajos reflejan condiciones puntuales de menor disponibilidad de sustratos orgánicos, humedad reducida o limitaciones texturales

locales. En conjunto, esta clasificación constituye una herramienta útil para establecer valores de referencia ecológicos de la masa microbiana del suelo en suelos vírgenes y para apoyar el monitoreo de la calidad biológica del suelo en ecosistemas similares. (Wardle, 2002; Sparling, 1997).

En la microcuenca del río Talgua, la mayor proporción de los valores de MMS se concentró en las categorías moderada y adecuado/óptima, lo que sugiere que los suelos evaluados mantienen un funcionamiento biológico favorable, propio de ecosistemas poco perturbados. Esta interpretación se respalda en que la biomasa microbiana constituye una fracción biológicamente significativa de la materia orgánica del suelo y un indicador sensible de su calidad y funcionamiento. Asimismo, su variación está estrechamente vinculada con factores como el contenido de carbono orgánico, la humedad, el pH y la textura, los cuales regulan la actividad y estabilidad de las comunidades microbianas. En este sentido, las categorías altas y extremadamente altas pueden asociarse a microambientes con mayor disponibilidad de sustratos orgánicos y condiciones más favorables para la actividad microbiana, mientras que las categorías bajas reflejan limitaciones locales que reducen dicho funcionamiento. En conjunto, esta categorización ecológica permite describir el estado funcional de la masa microbiana del suelo y aporta una base útil para el monitoreo comparativo de la calidad biológica en ecosistemas similares. (Hai Dang 2023).

6.4 Correlación entre las variables edáficas de los suelos de la microcuenca del Río Talgua

La figura 15 presenta una matriz de valoración de Spearman, empleada por tratarse de datos no paramétricos en la parte inferior se muestran coeficientes de evaluación (ρ) y en la parte superior la significancia (ns=no significativa, *=5%, **=1%, ***=0,1%). Se observan correlaciones positivas y altamente significantes entre el carbono orgánico (CO) y materia orgánica (MO) ($\rho=1.00$), así como entre carbono microbiano CO masa microbiana del suelo MMS($\rho=0.55$), Mo y MMS ($\rho=0.55^{***}$) y humedad y masa microbiana (MMS) ($\rho=0.76^{***}$). La humedad también se relacionó positivamente con carbono orgánico (CO) y materia orgánica (MO) ($\rho=0.28^*$ en ambos casos).

En sentido contrario, la arena mostro correlaciones negativas fuertes y muy significativas con limo ($p=-0.69^{***}$) y con arcilla ($p=-0.85^{***}$), mientras que el carbono orgánico (CO) y materia orgánica (MO) se correlacionaron negativamente con la arcilla ($p= -0.36^{**}$ en ambos casos). Entre humedad y pH se logró una compensación negativa moderada y significativa($p=-0.32^{**}$). El resto de las combinaciones de variables presentaron coeficientes bajos y no significativos.

La matriz de evaluación de spearman muestra que la MMS se asocia fuertemente con el carbono orgánico, la materia orgánica y la humedad, lo que indica que la biomasa microbiana aumenta donde hay más carbono disponible y mejores condiciones de humedad. A la misma vez carbono y materia orgánicos se relacionan positivamente con la humedad, reflejando que los suelos más arenosos almacenan menos agua y carbono, lo cual coincide con lo señalado por (El suelo y su rol en la captura de carbono (en línea) 2025) La correlación negativa entre humedad y pH ($p=-0.32^{**}$) sugiere que los sitios más húmedos tienden a ser algo más ácidos. En conjunto, estos resultados confirman que la MMS responde de manera integrada al carbono, la humedad y la textura del suelo, por lo que respalda su uso como bioindicador del estado ecológico de los suelos vírgenes de la microcuenca.

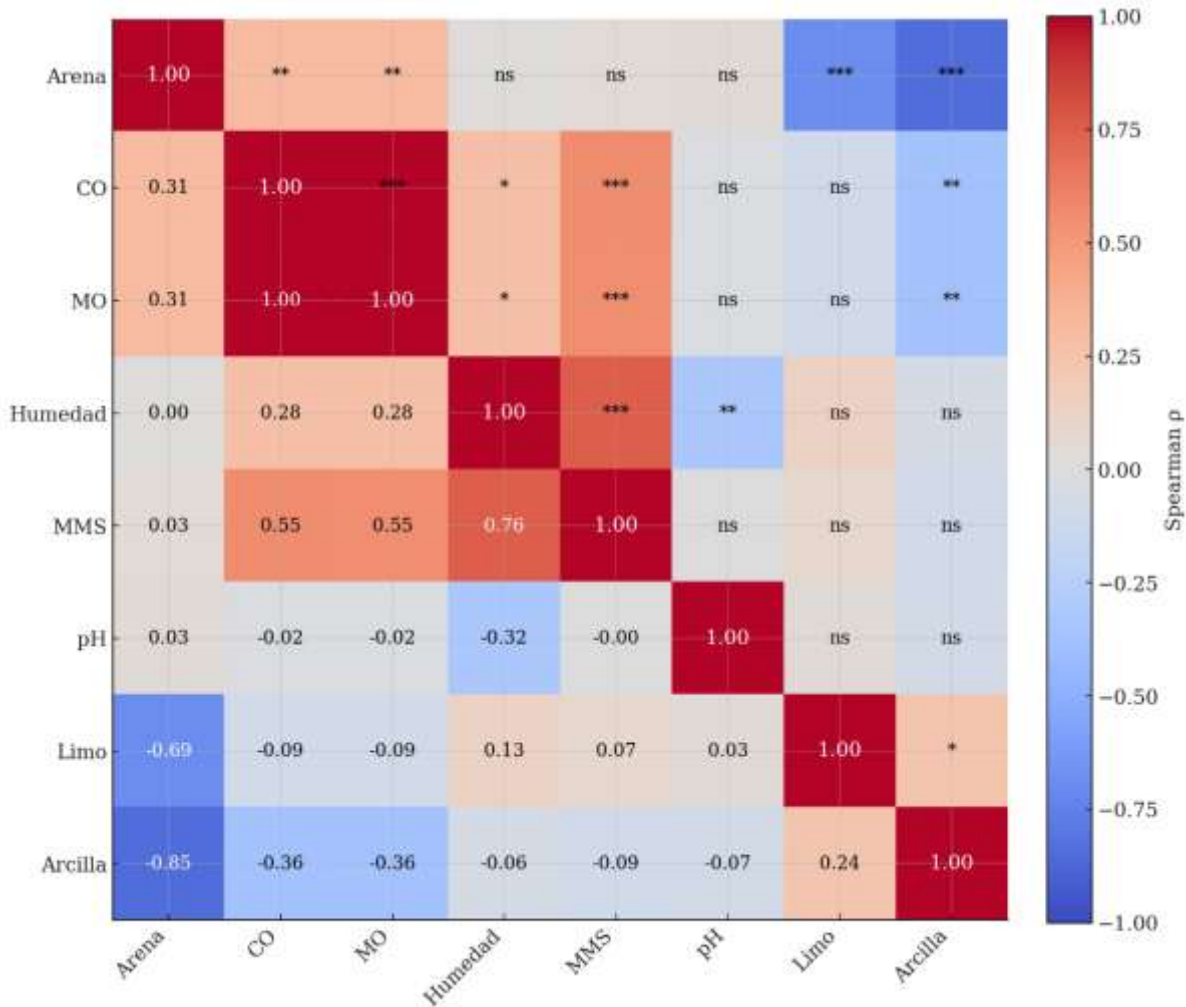


Figura 15 Matriz de correlación de parámetros fisicoquímicos y biológicos de los suelos analizados.

6.5 Caracterización multivariada de las propiedades edáficas del suelo mediante análisis de componentes principales (CP1 –CP2)

En la figura 16 se presenta el grafico de componentes principales CP1-CP2, el cual explica en conjunto el 81.5% de la variabilidad total de los datos (49.4% en CP1 y 32.1% en CP2), permitiendo identificar los principales patrones de asociación entre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, como la masa microbiana del suelo y la humedad, se agrupan en el sector positivo del CP1, mostrando una asociación directa con condiciones edáficas favorables para el desarrollo microbiano.

Asimismo, el carbono orgánico y la materia orgánica se relacionan principalmente con el CP2,

reflejando su papel en la diferenciación de los sitios según la disponibilidad. En contraste en variables como la arena y el pH se ubican en cuadrantes opuestos, indicando ambientes con menor retención de agua y carbono. Este patrón sugiere que la masa microbiana del suelo responde de manera integrada a la disponibilidad de carbono, humedad y textura, lo cual es consistente con estudios que señalan a la biomasa microbiana como un indicador sensible de la calidad y funcionamiento biológico del suelo (Anderson & Domsch, 2010).

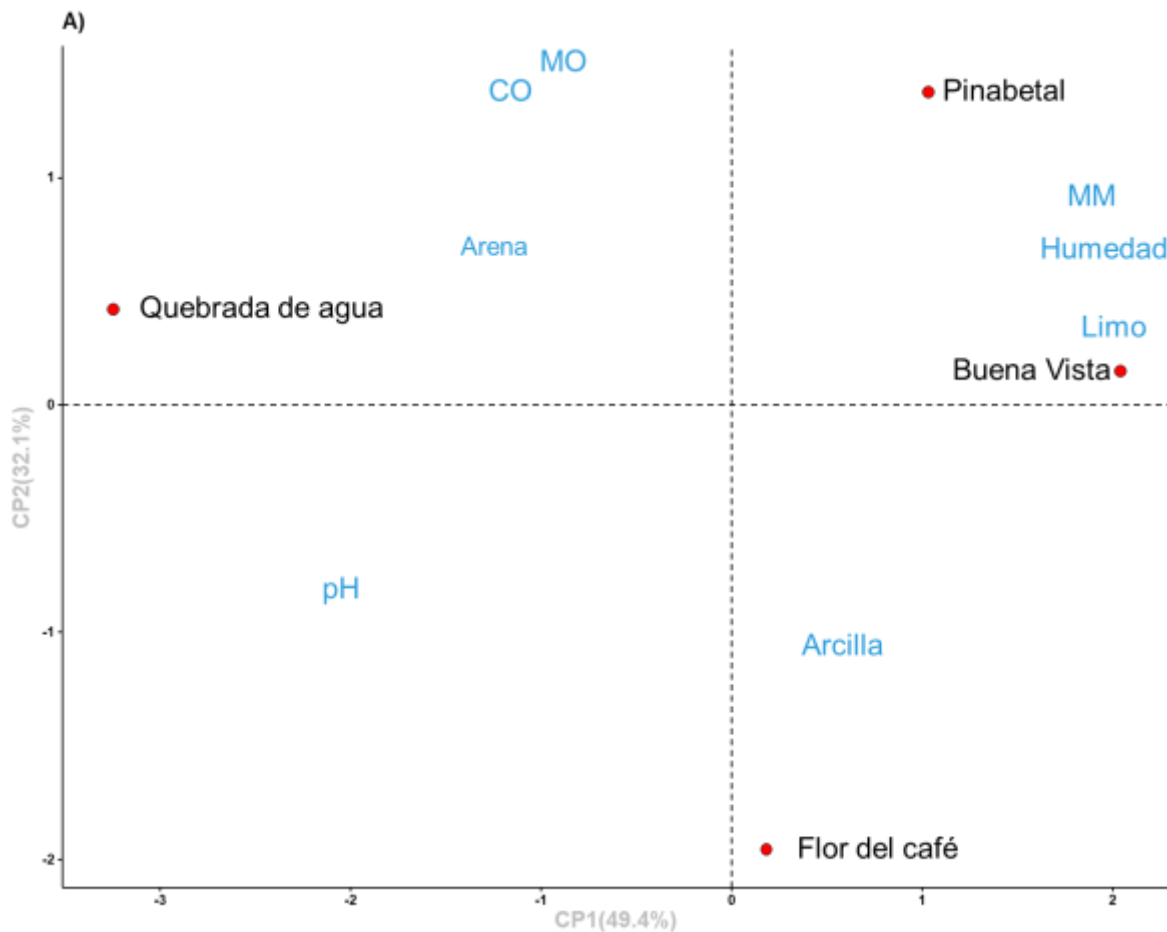


Figura 16 Biplot del análisis de componentes principales (ACP) entre CP1 y CP2, mostrando la asociación entre muestras y propiedades Físicoquímicas del suelo en la Microcuenca del Río Talgua.

6.6 Contribución de las variables edáficas a los tres primeros componentes principales CP1, CP2 y CP3

Como se observa en la Figura 14, las propiedades edáficas presentan aportes diferenciados a los tres primeros componentes principales del análisis multivariado. En el CP1, las variables con mayor contribución corresponden al pH, limo, humedad y masa microbiana del suelo (MMS), lo que indica que este componente está asociado principalmente a procesos relacionados con la actividad biológica y las condiciones químicas generales del suelo, reflejando la influencia conjunta de la disponibilidad de agua y la dinámica microbiana sobre el funcionamiento edáfico (Anderson & Domsch, 2010).

En el CP2, destacan claramente la arcilla y la arena, seguidas por aportes moderados de carbono orgánico y materia orgánica, lo cual sugiere que este eje está fuertemente vinculado a la textura del suelo y a las propiedades físicas que regulan la retención de agua, la aireación y la protección del carbono orgánico, factores clave para la estabilidad estructural del suelo (Six et al., 2002).

Por su parte, el CP3 muestra una mayor contribución de la materia orgánica y el carbono orgánico, acompañados por la arcilla y la masa microbiana, lo que indica que este componente refleja procesos asociados a la acumulación de carbono y a la eficiencia del uso de los recursos por parte de la comunidad microbiana, reforzando el papel de la materia orgánica como eje central de la calidad biológica del suelo (Lal, 2004). En conjunto, estos resultados confirman que la variabilidad edáfica de la microcuenca del Río Talgua responde a una interacción integrada entre factores físicos, químicos y biológicos, determinantes del estado ecológico del suelo

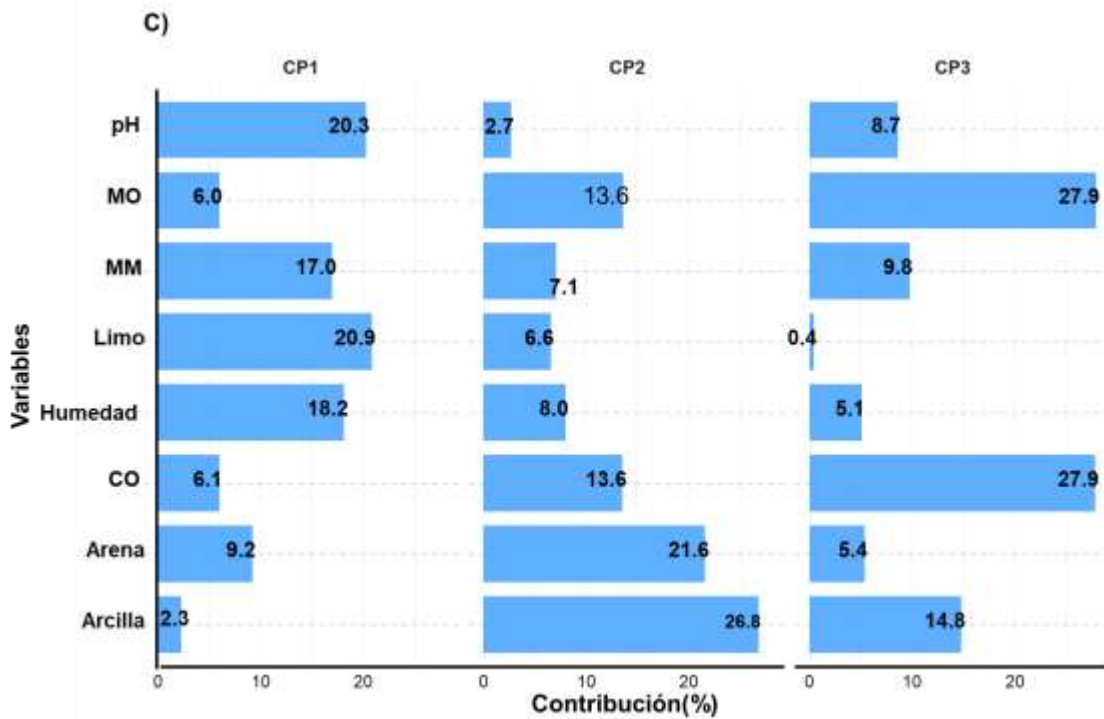


Figura 17 Contribución porcentual de las propiedades fisicoquímicas del suelo a los tres componentes principales CP1,CP2 y CP3 según el análisis de componentes principales realizados en la Microcuenca del Río Talgua.

6.7 Análisis de agrupamiento jerárquico de las muestras de suelo según variables edáficas

El análisis de clúster jerárquico permitió identificar cuatro grupos principales de muestras con comportamientos edáficos similares dentro de la microcuenca del río Talgua. En el grupo azul claro se agrupan muestras como 56QA, 3P, 50QA, 26FC, 48QA, 52QA, 46QA, 51QA, 55QA, 49QA, 53QA, 2P, 47QA y 57QA, pertenecientes principalmente a Quebrada de Agua, Pinabetal y algunas de Flor del Café. Estas muestras se consideran semejantes porque, en general, presentan contenidos relativamente altos de carbono orgánico, materia orgánica y masa microbiana, asociados además a texturas dominadas por arena franca o franco arenosa.

En el grupo verde se ubican muestras como 63QA, 60QA, 64QA, 58QA, 59QA, 36FC, 37FC, 33FC, 38FC, 30FC, 27FC, 40FC, 25FC, 28FC, 29FC, 41FC, 11BV, 12BV, 15BV, 1P, 32FC y

45FC, procedentes de Quebrada de Agua, Flor del Café, Buena Vista y Pinabetal, las cuales muestran similitud por presentar valores intermedios a altos de humedad, carbono orgánico, materia orgánica y masa microbiana, indicando suelos con condiciones biológicas favorables y mayor estabilidad ecológica.

Por su parte, en el grupo amarillo se concentran muestras como 13BV, 10BV, 20FC, 61QA, 74QA, 34FC, 35FC, 39FC, 7BV, 8BV, 62QA, 65QA, 67QA, 66QA y 68QA, correspondientes a Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua, las cuales se asemejan principalmente por presentar mayor proporción de arcilla y limo, además de valores intermedios o bajos de humedad y masa microbiana, lo que refleja una condición biológica más moderada.

Finalmente, el grupo azul oscuro reúne muestras como 19FC, 16FC, 17FC, 21FC, 18FC, 22FC, 69QA, 23FC, 5P, 14BV, 4P y 54QA, provenientes de Flor del Café, Quebrada de Agua, Pinabetal y Buena Vista, que presentan similitud por sus menores contenidos de carbono orgánico, materia orgánica, humedad y masa microbiana, además de texturas franco arenosas o arenosas, lo que sugiere condiciones menos favorables desde el punto de vista biológico. En conjunto, el dendrograma evidencia que la textura del suelo, la humedad, el carbono orgánico, la materia orgánica y la masa microbiana fueron las variables que más influyeron en la formación de los grupos, mostrando la heterogeneidad natural de los suelos de la microcuenca.

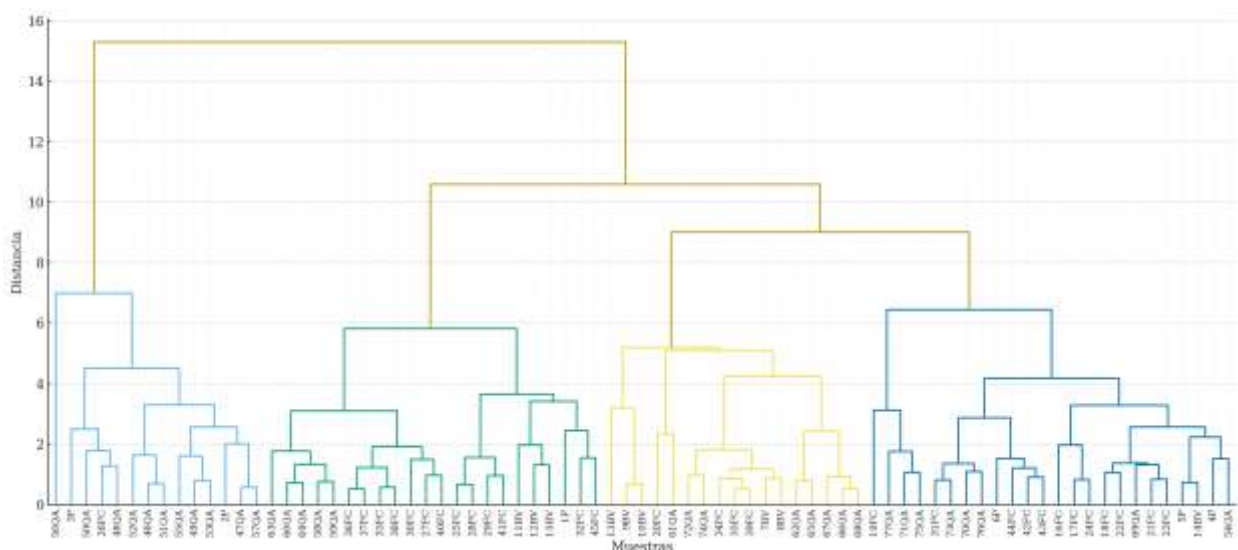


Figura 18 Dendrograma resultante del análisis de clúster jerárquico de las muestras de suelo según sus variables edáficas de la Microcuenca del Río Talgua.

VII CONCLUSIONES

- Los suelos sin intervención humana evaluados en las comunidades de Pinabetal, Buena Vista, Flor del Café y Quebrada de Agua se establecieron valores de referencia de masa microbiana (MMS), organizados en categorías desde muy bajas hasta extremadamente alta. La mayor parte de las muestras se concentró en los rangos moderados y adecuados/optimo, lo que indica que estos suelos presentan, en general, un buen estado biológico y pueden servir como base de comparación para futuras evaluaciones.
- La masa microbiana del suelo(MMS) mostró una distribución asimétrica positiva, con concentración principal entre 1000 y 2000 mgC/kg de suelo, lo que refleja una variabilidad natural propia de ecosistemas conservados. Este comportamiento confirma que los suelos vírgenes de la microcuenca del río Talgua mantienen una actividad microbiana funcionalmente estable, aunque con diferencias entre sitios según sus condiciones edáficas.
- Los principales factores edáficos que influyeron en la masa microbiana del suelo fueron el carbono orgánico, la materia orgánica, la humedad y la textura, al presentar relaciones positivas y favorecer condiciones adecuadas para la actividad microbiana. En conjunto, estos resultados evidencian que la biomasa microbiana responde de manera integrada a las propiedades físicas y químicas del suelo, por lo que constituye un indicador útil del estado ecológico de los suelos de la microcuenca del río Talgua.

VIII. RECOMENDACIONES

- Utilizar los valores de masa microbiana del suelo obtenidos en esta investigación como referencia local para evaluar el estado biológico de suelos en otras microcuencas con condiciones edáficas y climáticas similares.
- Profundizar en investigaciones que incluyan otros indicadores biológicos del suelo, como respiración basal, enzimas del suelo y diversidad microbiana, para fortalecer la evaluación integral de la calidad del suelo.
- Fortalecer la protección de los suelos vírgenes de la microcuenca del río Talgua, reconociendo su valor ecológico y su papel clave en la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acosta, Y; Paolini, J. 2006. Dinámica de la biomasa microbiana (C y N) en un suelo de la península de Paraguaná tratado con residuos orgánicos (en línea). Multiciencias Vol. 6, N° 2, 2006:9. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/904/90460212.pdf>.
- AGVISE. s.f. Biological Activity Testing. Northwood, USA, AGVISE Laboratories. Disponible en: <https://www.agvise.com/wp-content/uploads/2012/10/Biological-Activity-Testing.pdf>
- Anderson, H; Domsch, KH. s. f.1989 Proporciones de carbono de biomasa microbiana respecto al carbono orgánico total en suelos cultivables (en línea). Scien Direct 21(4). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003807178990117X>.
- Arsiniegas Ortega. 2023. metodología para evaluación de calidad del suelo en la creciente contaminación ambiental, mediante teledetección en la búsqueda de un desarrollo sustentable (en línea). s.l., Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en https://oa.upm.es/73759/1/SUSANA_ARCINIEGAS_ORTEGA.pdf.
- Australia Soil Quality. s.f. Microbial biomass carbon. Perth, AU, Soil Quality Pty Ltd. Disponible en: <https://www.soilquality.org.au/factsheets/microbial-biomass-carbon-nsw>
- Agrícolas Vol.4 Núm.3 01. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263127575002.pdf>.
- Báez, S et al. (2021) Indicadores microbiológicos de la calidad de suelos tropicales en ecosistemas del noreste del Perú http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172019000200008
- Barea, M; Cabrera, R; Brossard, M. 2005. Efecto de biofertilizantes bacterianos sobre el crecimiento de un cultivar de maíz en dos suelos contrastantes venezolanos (en línea). Agronomía Tropical v.58 n.5:52. Disponible en https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2008000400008.

- Bautista, DrF; Aguilera, DraA. 2023. CIENCIA DEL SUELO Hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso suelo (en línea). II. s.l., Ciudad Universitaria UNAM. Disponible en https://www.smcsmx.org/files/2023/LIBRO_2_2023.pdf.
- Beltrán Pineda, ME; Rocha Gil, ZE; Bernal Figueroa, AA; Pita Morales, LA. 2017. microorganismos funcionales en suelos con y sin revegetalización en el municipio de villa de Leyva, Boyacá (en línea). Colombia Forestal 20, núm. 2. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/4239/423951477005.pdf>.
- Bernal, A; Hernández, A; Meza, M; Rodríguez, O; Reyes, R. 2018. características de los suelos y sus factores limitantes de la región de murgas, provincia la habana (en línea). INCA. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193239249005.pdf>.
- Biomasa microbiana del suelo y respiración. 2022. (en línea, sitio web). Disponible en <https://microbiometer.com/es/blog/what-is-the-difference-between-microbial-biomass-and-microbial-respiration-rate/#:~:text=Es%20muy%20importante%20que%20haya,y%20la%20fertilidad%20de%20suelo.>
- Bolton, et al. 1985. Microbial biomass in soil varies among soil types and vegetation systems. <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/microbial-biomass-in-soil?>
- Brady, NC; Weil, RR. 2016. *The nature and properties of soils*. 15 ed. Columbus, OH, US, Pearson. https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition
- Bribiesca, R. 2021. La zona radicular: porosidad del suelo (en línea, sitio web). Consultado 12 nov. 2024. Disponible en <https://agrofacto.com/la-zona-radicular-porosidad-del-suelo/>.
- Brookes, P.et al. Measurement and role in nutrients cycling. https://repository.rothamsted.ac.uk/download/063c59ddf7f005bfdc9875507ef390887c6f280b384cd880433c3b595f3eb65a/507307/16_131.pdf.
- Castañeda Sosa, SICS; Villatoro Zamora, FU. 2006. Evaluación ecológico - hidrológica del Plan de Manejo de la microcuenca del Río Talgua, Olancho (en línea). s.l., Zamorano. . Disponible en <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/ceefd917-b74f-4d58-be35-31187f9a82f9/content>.

- Carranza Patiño, M; Aragundi Sabando, L; Macías Barrera, K; Paredes Sarabia, E; Villegas Ramírez, A. 2024. Conservación y Manejo Sostenible del Suelo en la Agricultura: Una Revisión Sistemática de Prácticas Tradicionales y Modernas (en línea). Grupo ACA Vol. 5 – Núm. E3 / 2024:28. Disponible en <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE3/303>.
- CDB. 2008. La biodiversidad y la agricultura (en línea). Convenio Sobre la Diversidad Biológica :60. Disponible en <https://www.cbd.int/doc/bioday/2008/ibd-2008-booklet-es.pdf>.
- Conant, J; Fadem, P. 2011. Guía comunitaria para la salud ambiental (en línea). Hesperian :635. Disponible en <https://ongcaps.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/04/guc3ada-comunitaria-para-la-salud-ambiental.pdf>.
- COARVAL. 2022. Clasificación de los tipos de suelos (en línea, sitio web). Consultado 15 nov. 2024. Disponible en <https://coarval.com/clasificacion-de-los-tipos-de-suelos/>.
- Cortés, DL; Pérez, JH; Camacho-Tamayo, JH. 2013. Relación espacial entre la conductividad eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo (En Línea). Scielo Vol. 5. Disponible En <Http://Www.Scielo.Org.Co/Pdf/Rudca/V16n2/V16n2a14.Pdf>.
- Chen, GC, He, Z. (2004). Efectos del pH en la biomasa microbiana de -C y -P en suelos rojos. En: Wilson, MJ, He, Z., Yang, X. (eds.) Los suelos rojos de China. Springer, Dordrecht. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-2138-1_22
- Dalal, R.C. 1998. Soil microbial biomass—what do the numbers really mean? *Australiano Journal of Experimental Agricultura*, 38(7): 649-665. Disponible en: <https://doi.org/10.1071/EA98076>
- Definición de la calidad del suelo para un entorno sostenible. 1995. s.l., Publicaciones especiales de la SSSA, vol.35. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35>.
- EGC. 2023. Tabla de interpretación de análisis de suelo para optimizar tu cultivo (en línea, sitio web). Consultado 22 nov. 2024. Disponible en <https://egcconsulting.net/tabla-de-interpretacion-de-analisis-de-suelo-para-optimizar-tu-cultivo/>.
- Eurofins Agro (2021) Soil. Microbial Biomass Technical Leaflet. <https://cdnmedia.eurofins.com/apac/media/609711/09-soil-microbial-biomass-leaflet-chon-edit-5sep2021.pdf?>
- FAO. 1995. El suelo: Propiedades y funciones Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en

- <https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s04.htm>.
- FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos. Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>.
- FAO. 2015. Generalidades (en línea, sitio web). Consultado 12 nov. 2024. Disponible en https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s01.htm#:~:text=Los%20minerales%20del%20suelo&text=Las%20part%C3%ADculas%20minerales%20reciben%20distintos,visibles%20a%20trav%C3%A9s%20del%20microscopio
- FAO. 2015. Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables (en línea, sitio web). Consultado 17 nov. 2024. Disponible en <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/#:~:text=Preguntas%20frecuentes,Los%20suelos%20sanos%20son%20la%20base%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de,el%20fundamento%20del%20sistema%20alimentario>.
- FAO. 2023. programa conjunto fao/oms sobre normas alimentarias comisión del Codex alimentarias (en línea, sitio web). Consultado 27 nov. 2024. Disponible en https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/zh/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-701-45%252FFinal%252520Report%252520CAC45%252FREP22_CACs.pdf.
- FAO 2017. Disponible en [https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e5e1fa9-ef55-4198-9160-fa580483f991/content#:~:text=La%20p%C3%A9rdida%20de%20carbono%20tambi%C3%A9n,FAO%20y%20GTIS%2C%202015\).&text=Figura%201%20%C2%B7%20COS%20en%20el%20ciclo%20global%20del%20carbono.,-Page%2015](https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e5e1fa9-ef55-4198-9160-fa580483f991/content#:~:text=La%20p%C3%A9rdida%20de%20carbono%20tambi%C3%A9n,FAO%20y%20GTIS%2C%202015).&text=Figura%201%20%C2%B7%20COS%20en%20el%20ciclo%20global%20del%20carbono.,-Page%2015).
- FAO. (2023). PROGRAMA CONJUNTO FAO/OMS SOBRE NORMAS ALIMENTARIAS. Obtenido de https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/zh/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-701-45%252FFinal%252520Report%252520CAC45%252FREP22_CACs.pdf

- FAO. 2024. Manejo de suelos arenosos (en línea, sitio web). Consultado 15 nov. 2024. Disponible en <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-arenosos/es/#:~:text=Los%20suelos%20arenosos%20son%20compuestos,la%20capacidad%20de%20retenci%C3%B3n%20h%C3%ADdrica>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura); ITPS; GSBI; SCBD; EC (Comisión Europea). 2020. State of knowledge of soil biodiversity: status, challenges and potentialities. Roma, IT, FAO.
- García, Y; Ramírez, W; Sánchez, S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso (en línea). Central España Republicana Vol. 35, No. 2:15. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269125071001.pdf>.
- González Ulibarry, P. 2023. Agricultura sostenible (en línea). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile :8. Disponible en https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/35667/1/Agricultura_sostenible.pdf.
- Gutiérrez Barriga, FR. 2006. Actividad microbiana como indicador microbiológico de la calidad del suelo precordillerano bajo tres ecosistemas Forestales (en línea). s.l., Universidad de Concepción (Chile). Unidad Académica Los Ángeles. Departamento Forestal. Disponible en <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/18358>.
- Hai Dang, HD. 2023. Biomasa Microbiana Del Suelo (en línea). Eurofins. Disponible en <https://cdnmedia.eurofins.com/apac/media/k3hjvnex/soil-microbial-biomass.pdf>.
- Hernández Flores, L; Munive Hernández, JA; Sandoval Castro, E; Martínez Carrera, D; Villegas Hernández, MaC. 2013. Efecto de las prácticas agrícolas sobre las poblaciones bacterianas del suelo en sistemas de cultivo en Chihuahua, México* (en línea). Revista Mexicana de Ciencias
- HEROGRAMA. 2022. La importancia de los microorganismos en el suelo (en línea, sitio web). Consultado 7 nov. 2024. Disponible en <https://herograespeciales.com/la-importancia-de-los-microorganismos-en-el-suelo/#:~:text=Los%20microorganismos%20aumentan%20la%20fuente,del%20f%C3%B3foro%20en%20el%20suelo>.
- Hydbom, H. 2024. Efectos de la labranza y el manejo del uso de la tierra sobre la materia

- orgánica del suelo y la biomasa microbiana del suelo en una red de campos de granjas prácticas. (en línea). Scielo 202. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139324003159>.
- Intagri. 2016. Importancia de la Materia Orgánica (MO) en la Actividad Biológica en el suelo Extraído de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/importancia-de-la-materia-organica-en-la-actividad-biologica-en-el-suelo> - Esta información es propiedad intelectual de INTAGRI S.C., Intagri se reserva el derecho de su publicación y reproducción total o parcial. (en línea, sitio web). Consultado 11 nov. 2024. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/suelos/importancia-de-la-materia-organica-en-la-actividad-biologica-en-el-suelo>.
- Kabelka, J.et al.(2025) Assessment of soil organic matter and microbial role <https://www.mdpi.com/2073-445X/14/1/183/pdf>
- Kotas Hana Santrucková, Josef Elster^{3,4}, and Eva Kosovska (2018) <https://bg.copernicus.org/articles/15/1879/2018/bg-15-1879-2018.pdf>.
- Klute A. (1986). Métodos de Análisis de Suelos. Número 9, parte 1. Métodos Físicos y Mineralógicos, Segunda Edición. Madison, Wisconsin, 404-408.
- La importancia del suelo en la agricultura. 2023. (en línea, sitio web). Consultado 12 nov. 2024. Disponible en <https://campodigital.es/la-importancia-del-suelo-en-la-agricultura/>.
- La relación entre el carbono de la biomasa microbiana y el carbono orgánico del suelo como indicador sensible de los cambios en la materia orgánica del suelo. 2021. Soil Research 30. Disponible en <https://connectsci.au/sr/article-abstract/30/2/195/156623/Ratio-of-microbial-biomass-carbon-to-soil-organic?redirectedFrom=fulltext>.
- Lorenzini, G; Soledad, M; Vidal Arcos, S. 2007. Correlación de Determinación de Humedad de Suelos por Medio de Secado en Horno y en Microondas (en línea). Revista de la Construcción, 6, Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1276/127619409003.pdf>.
- Mario Raudes y Norman Sagastume (2009) Manual Conservación de suelos. Cooperación Suiza En América Central :77. Disponible en https://www.se.gob.hn/media/files/media/Modulo_3_Manual_Conseervacion_de_Suelos.pdf.
- Martinez, E; Fuentes, JP; Acebedo, E. 2018. Carbono Orgánico y Propiedades del suelo (en línea). Scielo Vol. 8. Disponible en <https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718->

27912008000100006&script=sci_arttext.

Matus, FJ. 2021. El contenido de limo fino y arcilla es el principal factor que define las acumulaciones máximas de C y N en los suelos: un meta análisis. (en línea). Científica Reporte 64. Disponible en https://www-nature-com.translate.goog/articles/s41598-021-84821-6?error=cookies_not_supported&code=8a0b5b81-092c-4464-b977-ef01001eb66e&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc.

MICROCURREÍCULO MICROBIOLOGIA DE SUELOS. 2022. Universidad Libre :6. Disponible en <https://www.unilibrebaq.edu.co/unilibrebaq/images/microbiologia/octavo/microbiologiaadesuelos.pdf>.

Microbiology and Ecology. 2015. Science Directed. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/book/9780124159556/soil-microbiology-ecology-and-biochemistry>.

Moreno Sarmiento, N. 2016. La agricultura sostenible un reto para la microbiología del suelo (en línea). Revista Colombiana Biotecnología XVIII, núm. 1. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/776/77645907001/html/>.

M. Vogel, AMV; Below, FE. 2018. Hybrid Selection and Agronomic Management to Lessen the Continuous Corn Yield Penalty (en line). Agronomy. Disponible en <https://www.mdpi.com/2073-4395/8/10/228/pdf>.

NU. 2024. Convenio sobre la Diversidad Biológica, instrumento internacional clave para un desarrollo sostenible (en línea, sitio web). Consultado 21 nov. 2024. Disponible en <https://www.un.org/es/observances/biodiversity-day/convention>.

Osorio-Vega, N. W. (2009). Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos & Centro Nacional de Investigaciones de Café (Eds.), *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola: Segundo seminario regional comité regional eje cafetero* (pp. 43–71). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0003_3

Pertile, M.; Nogueira, M.A.; Alves, M.C.; Hungria, M. 2020. Soil microbial biomass and activity in different agricultural systems. *Scientific Reports*, 10: 8515. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64648-3>

- Ph ¿qué es? ¿y cómo se mide? (2022). s.l., s.e. Consultado 16 nov. 2024. Disponible en <https://vinculacion.unah.edu.hn/dmsdocument/16228-4-el-ph-que-es-y-como-se-mide-pdf>.
- Prajuli, B; Khatri, S; Lamichhane, N; Prasad, RK; Prasad, C. 2025. Propiedades fisicoquímicas del suelo y carbono de la biomasa microbiana en un agroecosistema de regadío de las zonas de media montaña de Nepal. (en línea). Discover Soil Vol 2. ¿Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s44378-025-00125-5?>
- Prommer, J. et al. (2019). El aumento del crecimiento, la biomasa y la renovación microbiana impulsan la acumulación de carbono orgánico en el suelo con niveles elevados de CO₂. Scientific Reports <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7027739/pdf/41598-019-45505-9.pdf>
- Reyes, JT; Serrano, A. 2021. Análisis morfométrico y biofísico en la cuenca del río Talgua, Honduras (en línea). Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar Volumen 5, Número 6.:19. Disponible en <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/1214>.
- Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. 2017. (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v8n42/2007-1132-remcf-8-42-00123.pdf>.
- Rumpel, C; Amiraslani, F; Chenu, C; Cardenas, MG; Kaonga, M; Kätterer, T; Kätterer, T; Powlson, D; et al. 2025. Clay-based carbon stabilization of organic amendments to increase soil organic carbon stocks. Advances in Agronomy. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211325000781>
- Suelo Arcilloso: qué es, qué cultivar y cómo mejorar el suelo. 2020. (en línea, sitio web). Consultado 13 nov. 2024. Disponible en <https://probelte.com/es/noticias/suelo-arcilloso-que-es-que-cultivar-y-como-mejorar-el-suelo/>.
- Suelos. 2024. (en línea, sitio web). Consultado 10 nov. 2024. Disponible en <https://concepto.de/suelo/>.
- SSSA. (1996). Métodos de análisis de suelos. Parte 3: métodos químicos. 487-488. <https://doi.org/10.2136/SSSABOOKSER5.3>
- Tipos de Suelos. 2018. (en línea, sitio web). Consultado 15 nov. 2024. Disponible en <https://concepto.de/suelo/>.

- Toledo, M. 2020. Biomasa y actividad microbiana en suelos de uso ganadero y en regeneración de bosque. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 41(1): 65-74. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7756124>
- Torres, LA; González Pedraza, AF; Castellanos, L. 2024. Impacto de diferentes prácticas agrícolas sobre las características fisicoquímicas del suelo: un análisis crítico (en línea). *Revista Ambiental* Vol. 15 Núm. 1 (2024). Disponible en <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/issue/view/237>.
- USDA; Lutters, A; Salazar, JC. 2000. Área de Cartografía de Suelos y Evaluación de Tierras (en línea). USDA. Disponible en <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20y%20Salud%20del%20Suelo.pdf>.
- USDA 2016. Field Guide to Soil Texture Classes (USDA). Richmond, VA, US, VDH. 2016. Field Guide to Soil Texture Classes (USDA). Richmond, VA, US, VDH.pdf.
- Valores de Referencia para Sustancias Químicas en Suelo. 2015. Catholic Relief Services :12. Disponible en <https://dicta.gob.hn/files/2015-Normativa-de-suelos.pdf>.
- Vallejo, VE. 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos a través del componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles (en línea). *Colombia Forestal* Vol. 16 Núm. 1 (2013). Disponible en <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/3955>.
- Visión general de los suelos. 2022. Sociedad de Ciencias del Suelo de América. Disponible en <https://www.soils.org/files/about-soils/soils-overview.pdf>.
- Walkley, A., & Black, A. (1934). Un examen del método de Degtjareff para determinar la materia orgánica del suelo y una modificación propuesta del método de titulación con ácido crómico. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Yanez Díaz, MI. 2017. Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. (en línea). *SciELO* Vol 8. Disponible en https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322017000400123&script=sci_abstract.
- Zhang, A. 2025. Fertilidad del Suelo: El Fundamento de la Agricultura Sostenible (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.agri-tecno.com/es/fertilidad-del-suelo-el-fundamento-de-la-agricultura-sostenible/>.

Zhu, B. et al. (2021). The soil microbial carbon pump <https://publish.illinois.edu/delucia-lab/files/2021/10/The-soil-microbial-carbon-pump.pdf>