



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería Agrícola

Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y hongos micorrízicos sobre la macro porosidad del suelo y el desarrollo vegetativo del cafeto (*Coffea-arabica* L.), en La Argelia, provincia de Loja

Trabajo de Integración Curricular
previo a la obtención del título de
Ingeniero Agrícola

AUTOR:

Angel Francisco Guayanay Castillo

DIRECTOR:

Ing. Miguel Ángel Villamagua, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2025

Certificación

Loja, 23 de febrero de 2023

Ing. Miguel Ángel Villamagua. M.Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y hongos micorrízicos sobre la macro porosidad del suelo y el desarrollo vegetativo del cafeto (*Coffea-arabica* L.), en La Argelia, provincia de Loja**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Agrícola**, de la autoría del estudiante **Angel Francisco Guayanay Castillo**, con cédula de identidad Nro.**1105143547**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Miguel Ángel Villamagua. M.Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Angel Francisco Guayanay Castillo**, declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma: 

Cédula de identidad: 1105143547

Fecha: 15 de enero de 2025

Correo electrónico: angel.guayanay@unl.edu.ec

Celular: 0968974720

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.

Yo, **Angel Francisco Guayanay Castillo**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y hongos micorrízicos sobre la macro porosidad del suelo y el desarrollo vegetativo del cafeto (*Coffea-arabica* L.), en La Argelia, provincia de Loja**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero Agrícola**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad. La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los quince días del mes de enero del dos mil veinticinco.

Firma: 

Autor: Angel Francisco Guayanay Castillo

Cédula de identidad: 1105143547

Dirección: Bellavista – Espíndola

Correo electrónico: angel.quayanay@unl.edu.ec

Celular: 0968974720

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Integración Curricular: Ing. Miguel Ángel Villamagua, Mg. Sc.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a mi familia, especialmente a mis padres, José Guayanay y Cecilia Castillo, cuyo constante apoyo, tanto económico como moral, ha sido el pilar de mi trayectoria académica desde la educación primaria hasta el nivel superior.

A mis hermanos y amigos, quienes con su motivación y aliento han sido una fuente de fortaleza inagotable, impulsándome a perseverar y alcanzar mis metas.

Extiendo esta dedicatoria a mis profesores, en particular a quienes contribuyeron en la realización de este Trabajo de Integración Curricular y a aquellos que, a lo largo de mi carrera, compartieron sus conocimientos y valores, dejando una huella profunda en mi desarrollo personal y profesional.

Angel Francisco Guayanay Castillo

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja, a la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, y a la Carrera de Ingeniería Agrícola por su invaluable apoyo en la realización de esta meta académica.

De manera especial, reconozco al Ing. Miguel Ángel Villamagua, Mg. Sc., Director del Trabajo de Integración Curricular, por su constante respaldo y orientación, cuya experiencia y guía fueron esenciales para el desarrollo y culminación de este trabajo.

Agradezco profundamente también a todos quienes me han acompañado en mi formación universitaria, en particular a mis padres, hermanos y amigos, cuyo apoyo incondicional y presencia fueron fundamentales para alcanzar esta meta académica.

Angel Francisco Guayanay Castillo

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de anexos	xii
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract.....	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1. Características óptimas para el desarrollo de un cafetal.....	6
4.1.1. Altitud	6
4.1.2. Temperatura.....	6
4.1.3. Precipitaciones	6
4.1.4. Humedad relativa	6
4.1.5. Viento	6
4.1.6. Topografía.....	7
4.1.7. Luminosidad	7
4.1.8. Características físico-químicas.....	7
4.2. Origen y distribución del café	7
4.2.1. Principales especies y sus características.....	7
4.2.1.1. Café arábigo.....	7
4.2.1.2. Café robusta.....	8
4.2.2. Fase de desarrollo vegetativo del café	9
4.3. Suelo.....	9
4.4. Propiedades físicas del suelo	9
4.4.1. Textura del suelo.....	9
4.4.2. Estructura del suelo.....	10
4.4.3. Densidad real	10
4.4.4. Densidad aparente	11

4.4.5. Porosidad	11
4.4.6. Relación entre la densidad aparente y la porosidad	12
4.5. Contenido de agua en el suelo	12
4.6. Fuerzas de retención del agua en el suelo	13
4.6.1. Potencial matricial	13
4.6.2. Potencial osmótico	14
4.6.3. Potencial gravitacional.....	14
4.6.4. Potencial de presión	15
4.7. Curva de retención del agua del suelo.....	15
4.7.1. Puntos importantes de la curva de retención de agua del suelo	16
4.7.1.1. Saturación.	16
4.7.1.2. Capacidad de campo.....	16
4.7.1.3. Punto de marchitamiento permanente.....	17
4.7.1.4. Humedad equivalente.....	18
4.8. Condiciones físicas del suelo para el crecimiento de las plantas	18
4.8.1. Capacidad de aireación	18
4.8.2. Agua aprovechable.....	19
4.8.3. Volumen inútil de poros	19
4.9. Compactación del suelo	19
4.10. Contenido de materia orgánica.....	19
4.10.1. Enmiendas orgánicas	20
4.10.2. Abonos orgánicos.....	20
4.10.2.1. Nutrisano.....	20
4.11. Hongos micorrízicos arbusculares.....	21
4.12. Materia orgánica y hongos micorrízicos arbusculares	23
4.13. Uso de los hongos micorrízicos arbusculares en los agroecosistemas.....	23
4.14. Presencia e importancia de los hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo de café	23
4.15. Resultados de otras investigaciones.....	24
5. Metodología	31
5.1. Descripción del área de estudio.....	31
5.2. Materiales.....	32
5.3. Diseño de la investigación	32
5.3.1. Distribución de las parcelas	33
5.4. Metodología por objetivos.....	35
5.4.1. Metodología para el primer objetivo.....	35
5.4.2. Metodología para el segundo objetivo	39

5.4.3. Análisis estadístico	39
6. Resultados.....	40
6.1. Evaluación de las propiedades físicas, características físicas e hidrofísicas del suelo ..	40
6.1.1. Densidad aparente	40
6.1.2. Porosidad total	40
6.1.3. Características físicas e hidrofísicas del suelo.....	41
6.1.3.1. Características físicas e hidrofísicas del suelo antes del ensayo.	41
6.1.3.2. Características físicas e hidrofísicas del suelo a los 180 días del ensayo.....	42
6.1.4. Curvas de retención de humedad.....	43
6.1.4.1. Curvas de retención de humedad antes del ensayo.	43
6.1.4.2. Curvas de retención de humedad a los 180 días del ensayo.....	44
6.2. Variables de crecimiento de la planta de café.....	45
6.2.1. Altura de planta	45
6.2.2. Diámetro del tallo.....	46
6.2.3. Número de ramas.....	47
6.2.4. Número de nudos	48
6.2.5. Número de hojas	49
7. Discusión.....	51
7.1. Factor no significativo (Hongos micorrízicos arbusculares)	51
7.2. Factor significativo (Abono orgánico).....	52
7.2.1. Densidad aparente (Da)	52
7.2.2. Porosidad total (Pt).....	53
7.2.3. Características físicas del suelo	54
7.2.4. Curva de retención de humedad.....	56
7.2.5. Variables de crecimiento de la planta de café.....	57
7.2.5.1. Altura de planta.	57
7.2.5.2. Diámetro del tallo.....	57
7.2.5.3. Número de ramas.....	58
7.2.5.4. Número de nudos.	59
7.2.5.5. Número de hojas.	60
8. Conclusiones.....	61
9. Recomendaciones.....	62
10. Bibliografía.....	63
11. Anexos	75

Índice de tablas

Tabla 1. Nivel de densidad aparente.....	11
Tabla 2. Clasificación de la calidad de suelo en función a su porosidad.	12
Tabla 3. Relación entre D_a (g cm^{-3}) y porosidad (%).	12
Tabla 4. Composición química del nutrisano.	21
Tabla 5. Clasificación de los hongos formadores de micorrizas.	22
Tabla 6. Factores de estudio.....	32
Tabla 7. Tratamientos.	33
Tabla 8. Promedios y prueba Tukey al 5 % para valores de densidad aparente (g cm^{-3}).	40
Tabla 9. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para porosidad total (%).	40
Tabla 10. Características físicas e hidrofísicas del suelo, zona del diagrama triangular e interpretación de los suelos del sistema agroforestal de la Quinta Experimental La Argelia antes del ensayo.	41
Tabla 11. Características físicas e hidrofísicas del suelo, zona del diagrama triangular e interpretación de los suelos del sistema agroforestal de la Quinta Experimental La Argelia a los 180 días del ensayo.....	42
Tabla 12. Valores de altura de la planta y prueba Tukey al 5 % de incrementos (0-210 días).	45
Tabla 13. Valores de diámetro de tallo y prueba Tukey al 5 % de incrementos (0-210 días).	46
Tabla 14. Valores de número de ramas (0-210 días).	48
Tabla 15. Valores de número de nudos y prueba Tukey al 5 % de incrementos (0-210 días).	49
Tabla 16. Valores de número de hojas y prueba Tukey al 5 % de incrementos (0-210 días).	50

Índice de figuras

Figura 1. Variedad Geisha	8
Figura 2. Potencial matricial en el suelo.	14
Figura 3. Proceso de osmosis.	14
Figura 4. Signo del potencial gravitacional.....	15
Figura 5. Curvas de retención de humedad del suelo.....	16
Figura 6. Descripción de una micorriza arbuscular.	22
Figura 7. Ubicación geográfica del proyecto de investigación, Estación Experimental La Argelia.....	31
Figura 8. Diseño experimental para la investigación del efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y hongos micorrízicos sobre la macro porosidad del suelo y el desarrollo vegetativo del cafeto (<i>Coffea-arabica</i> L.).....	34
Figura 9. Curva de retención de humedad de la calicata 1.	43
Figura 10. Curva de retención de humedad de la calicata 2.	43
Figura 11. Curva de retención de humedad de la calicata 3.	44
Figura 12. Curvas de retención de humedad de los suelos del sistema agroforestal de la Quinta Experimental La Argelia a los 180 días después de iniciado el ensayo.....	44
Figura 13. Modelo de regresión lineal para el incremento de altura de planta (0-210 días). 46	
Figura 14. Modelo de regresión lineal para el incremento de diámetro de tallo (0-210 días).	47
Figura 15. Incremento número de ramas (0-210 días).....	48
Figura 16. Modelo de regresión lineal para el incremento de número de nudos (0-210 días).	49
Figura 17. Modelo de regresión lineal para el incremento de número de hojas (0-210 días).	50

Índice de anexos

Anexo 1. Diagrama triangular para evaluar la condición física de los suelos para el crecimiento de las plantas.	75
Anexo 2. Dosis aplicadas por tratamiento de Abono orgánico (AO) (kg de Nutrisano).....	75
Anexo 3. Análisis de varianza de la densidad aparente del suelo (g cm^{-3}) y prueba Tukey (0-180 días).	76
Anexo 4. Análisis de varianza de la porosidad total del suelo (%) y prueba Tukey (0-180 días).	78
Anexo 5. Análisis de las características físicas e hidrofísicas del suelo y prueba Tukey (180 días).	80
Anexo 6. Análisis de varianza de la altura de planta (cm) y prueba Tukey (0-210 días).....	86
Anexo 7. Análisis de varianza del diámetro de tallo (mm) y prueba Tukey (0-210 días).....	87
Anexo 8. Análisis de varianza del número de ramas (0-210 días).	88
Anexo 9. Análisis de varianza del número de nudos y prueba Tukey (0-210 días).	89
Anexo 10. Análisis de varianza del número de hojas y prueba Tukey (0-210 días).....	90
Anexo 11. Reconocimiento del lugar.	91
Anexo 12. Limpieza del cultivo.	91
Anexo 13. Fertilización.	92
Anexo 14. Tomado de muestras.	92
Anexo 15. Monitoreo de las propiedades físicas (densidad aparente y saturación).	93
Anexo 16. Monitoreo de variables de crecimiento de la planta de café.....	93
Anexo 17. Resiembra de café.....	94
Anexo 18. Carta geológica Gonzanamá.	94
Anexo 19. Poster del proyecto de investigación.....	95
Anexo 20. Resultados de las características físicas e hidrofísicas.....	96
Anexo 21. Certificado de traducción del Resumen/Abstract.....	99

1. Título

Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y hongos micorrízicos sobre la macro porosidad del suelo y el desarrollo vegetativo del cafeto (*Coffea-arabica* L.), en La Argelia, provincia de Loja.

2. Resumen

El café es un cultivo de gran relevancia económica, ambiental y social a nivel global. En Ecuador, el sector cafetalero representa aproximadamente el 3 % del PIB. No obstante, la provincia de Loja, una de las principales zonas productoras de este cultivo, enfrenta desafíos como baja fertilidad, erosión y limitada aireación del suelo, factores que impactan negativamente los rendimientos. Esta investigación tuvo como objetivo mejorar la macroporosidad y la calidad del suelo en cafetales mediante la aplicación de abonos orgánicos (AO) y hongos micorrízicos arbusculares (HMA) nativos. El estudio se realizó en la Estación Experimental La Argelia de la Universidad Nacional de Loja, a 2 141 msnm, utilizando un diseño de bloques al azar con arreglo bifactorial. Se evaluaron 16 tratamientos con tres repeticiones, combinando cuatro niveles de AO (0, 6, 8 y 10 %) y cuatro niveles de HMA encapsulados (0, 10, 20 y 30). A los 180 días después del trasplante, se recolectaron 96 muestras de suelo para analizar propiedades físicas e hidrofísicas tras la aplicación de AO y la inoculación. Además, se evaluaron variables de crecimiento del café a los 120, 150, 180 y 210 días. Los resultados del análisis de varianza (ANAVA) mostraron que el AO fue el único factor significativo ($p \leq 0,05$). Las dosis de AO al 10 y 8 % redujeron la densidad aparente en 0,19 y 0,13 g cm^{-3} , respectivamente, y aumentaron la porosidad total en 16,72 y 14,02 % en comparación con el suelo control. El tratamiento con AO al 10 % mejoró la capacidad de aireación en 14,33 % θ_v y disminuyó la fracción de volumen físicamente inerte en 15,42 % θ_v . También incremento la humedad a saturación en 16,72 % θ_v y la capacidad de campo en 2,41 % θ_v . En términos de crecimiento vegetativo, el tratamiento con AO al 10 % incrementó la altura de las plantas en 21,4 cm y el diámetro del tallo en 4,3 mm, frente a los 18,1 cm y 3,2 mm del grupo de control. Aunque no se observaron diferencias significativas en el número de ramas ($p = 0,84$), las plantas tratadas con AO al 10 % presentaron un mayor número de nudos y hojas. En conclusión, la aplicación de AO mejoró significativamente las propiedades físicas e hidrofísicas del suelo y el crecimiento vegetativo del café. Estos hallazgos destacan el potencial de las enmiendas orgánicas para mejorar la productividad y sostenibilidad del sector cafetalero en Loja.

Palabras clave: cultivo de café, abono orgánico, hongos micorrízicos arbusculares, propiedades físicas e hidrofísicas del suelo, condiciones físicas del suelo, parámetros de crecimiento del café.

Abstract

Coffee is a crop of great economic, environmental, and social importance worldwide. In Ecuador, the coffee sector represents approximately 3% of the GDP. However, the province of Loja, one of the main coffee-producing areas, faces challenges such as low fertility, erosion, and limited soil aeration, which negatively impact yields. This research aimed to improve macroporosity and soil quality in coffee plantations through the application of organic amendments (OA) and native arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). The study was conducted at the La Argelia Experimental Station of the National University of Loja, located at 2,141 meters above sea level, using a randomized block design with a bifactorial arrangement. Sixteen treatments with three repetitions were evaluated, combining four levels of OA (0, 6, 8, and 10%) and four levels of encapsulated AMF (0, 10, 20, and 30). At 180 days after transplanting, 96 soil samples were collected to analyze physical and hydro-physical properties following OA application and AMF inoculation. Additionally, coffee growth variables were evaluated at 120, 150, 180, and 210 days. The analysis of variance (ANOVA) results showed that OA was the only significant factor ($p \leq 0.05$). OA doses of 10 and 8% reduced bulk density by 0.19 and 0.13 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectively, and increased total porosity by 16.72 and 14.02% compared to the control soil. The treatment with 10% OA improved air capacity by 14.33% θ_v and reduced the physically inert volume fraction by 15.42% θ_v . It also increased saturation moisture by 16.72% θ_v and field capacity by 2.41% θ_v . In terms of vegetative growth, the 10% OA treatment increased plant height by 21.4 cm and stem diameter by 4.3 mm, compared to 18.1 cm and 3.2 mm in the control group. Although no significant differences were observed in the number of branches ($p = 0.84$), plants treated with 10% OA showed a higher number of nodes and leaves. In conclusion, the application of OA significantly improved the physical and hydro-physical properties of the soil as well as the vegetative growth of coffee plants. These findings highlight the potential of organic amendments to enhance the productivity and sustainability of the coffee sector in Loja.

Keywords: coffee cultivation, organic amendments, arbuscular mycorrhizal fungi, physical and hydrophysical soil properties, soil physical conditions, coffee growth parameters.

3. Introducción

El café es uno de los cultivos agrícolas más importantes a nivel mundial, no solo por su valor económico, sino también por su impacto social y ambiental, desempeñando un papel crucial en la economía global y proporcionando un medio de vida para millones de familias en África, América Latina y Asia (Castro & Barrenzueta, 2020; Echeverri et al., 2005; Lagos et al., 2019). Entre las especies de café, *Coffea arabica* L. se destaca por representar aproximadamente el 85 % de la producción mundial, siendo además la más cultivada en América Latina (Figuroa-Hernández et al., 2016).

En Ecuador, el café constituye un sector económico estratégico que emplea a cerca de 200 000 personas y aporta alrededor del 3 % del Producto Interno Bruto (PIB) nacional. Gracias a su posición geográfica y a sus condiciones agroclimáticas favorables, el país produce variedades arábica y robusta en 23 de las 24 provincias (Castro & Barrenzueta, 2020). En 2019, el cultivo de café en Ecuador abarcó una extensión de 76 785 ha, de las cuales 7 457 ha correspondieron a la provincia de Loja, lo que equivale al 9,1 % del área total, con una producción de 1 789,68 t. Ese mismo año, el rendimiento ponderado nacional de *Coffea arabica* fue de 0,30 t ha⁻¹. A nivel territorial, la provincia con mayor rendimiento fue Morona Santiago, con 1,22 t ha⁻¹, seguida por Galápagos (0,98 t ha⁻¹), Pichincha (0,66 t ha⁻¹) y Zamora Chinchipe (0,57 t ha⁻¹). En contraste, las provincias con los rendimientos más bajos fueron Napo y Cotopaxi (0,11 t ha⁻¹ cada una) y Pastaza (0,07 t ha⁻¹), mientras que Loja presentó un rendimiento de 0,24 t ha⁻¹. Para la especie *Coffea canephora*, el rendimiento nacional fue superior, alcanzando 0,58 t ha⁻¹, destacándose las provincias de Santa Elena, Santo Domingo de los Tsáchilas y Napo como las de mayor productividad (Lema, 2019).

Las limitaciones en el rendimiento del cultivo en Loja se asocian principalmente con la degradación de los suelos, caracterizados por baja fertilidad, contenidos de materia orgánica (MO) inferiores al 2 %, y una capacidad de aireación (CA) crítica (5,0-8,5 %θv), condiciones que afectan el desarrollo radicular del cafeto y limitan su productividad (Lema, 2019; Villamagua et al., 2021). Además, prácticas como el uso indiscriminado de fertilizantes químicos sin análisis de suelo previo han exacerbado estas condiciones, resultando en suelos compactados y con baja macroporosidad.

Estudios realizados en diversas localidades de Loja han confirmado las limitaciones físicas de sus suelos. Por ejemplo, en la Estación Experimental La Argelia, los horizontes Ap/A1 presentan texturas franco a franco limoso, con una densidad aparente (Da) promedio de 1,37 g cm⁻³, 2,21 % de MO y una CA entre 14,3 y 6,9 %θv (Obaco, 2023). En Zapotepamba, el suelo es franco arcilloso a arcilloso, con una Da de 1,44 g cm⁻³, un contenido de MO de 5,10 % y una CA de 12 %θv (Picoita, 2021). En otras localidades como Consapamba y Pueblo Nuevo, se reportan suelos de baja CA (≤ 5,6 %θv) y un contenido de MO inferior a 2 %, con

densidades aparentes superiores a $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ (Zambrano, 2019). En Chaguarpamba, los horizontes Ap/AB presentan un contenido de MO de 5,85 %. En el horizonte Ap, la CA media es del 14 % θ_v , clasificada como media, mientras que en el horizonte AB la CA disminuye significativamente a 4 % θ_v , indicando condiciones de pobres a muy pobres. En Lozumbe, los horizontes Ap/Bt tienen un contenido de MO del 4,7 %; en el horizonte Ap, la CA es baja (5 % θ_v), y en el horizonte Bt disminuye aún más (4 % θ_v), clasificándose en condiciones muy pobres (Tandazo, 2019). Estos datos coinciden con lo observado por C. Valarezo et al. (1998), quienes señalan una baja capacidad de aireación promedio de 4,5 % θ_v en los suelos de Loja, atribuida principalmente a la degradación de la macroporosidad. Las texturas finas a medias, la erosión y la compactación por sobrepastoreo son factores clave que contribuyen a esta limitación, afectando negativamente el desarrollo radicular y la productividad del café.

Frente a estos desafíos, el uso de enmiendas orgánicas y biofertilizantes, como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), ofrece una solución prometedora para mejorar la calidad del suelo. Estos microorganismos mejoran las propiedades físicas del suelo, incrementan la macroporosidad, favorecen la formación de agregados, optimizan la aireación y promueven el desarrollo radicular del café (Berendsen et al., 2012; Bhardwaj et al., 2014). La Universidad Nacional de Loja ha impulsado investigaciones sobre el impacto de consorcios de HMA nativos combinados con enmiendas orgánicas en sistemas agroforestales de café para mejorar los agroecosistemas locales.

Este estudio aborda la baja aireación del suelo y los bajos rendimientos del café en el sur de Ecuador mediante ensayos de campo que evalúan el impacto de enmiendas orgánicas y consorcios de HMA nativos. Estos ensayos analizan mejoras en las propiedades físicas del suelo, especialmente la macroporosidad, y su influencia en el desarrollo inicial del cultivo, con el objetivo de proponer estrategias sostenibles para mejorar la productividad del café y apoyar a los pequeños productores.

Objetivo general

- Contribuir con información científico-técnica sobre el mejoramiento de la macroporosidad del suelo, por efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y consorcio de hongos micorrízicos arbusculares nativos en el sistema agroforestal de café de la Estación Experimental La Argelia.

Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de las enmiendas orgánicas y consorcios de HMA nativos sobre las condiciones físicas del suelo para el mejoramiento de la capacidad de aireación y enraizamiento del café.
- Monitorear el desarrollo vegetativo del cultivo de café frente a la aplicación de diferentes dosis de enmiendas orgánicas y consorcios de HMA nativos en el período de 90 - 210 días después de la siembra del café

4. Marco teórico

4.1. Características óptimas para el desarrollo de un cafetal

4.1.1. Altitud

La altitud ideal para el cultivo de café varía entre los 500 y 1 700 msnm, aunque en Ecuador se ha plantado a partir de los 300 msnm y por arriba de los 1 700 msnm (Venegas et al., 2018). A menores altitudes, los costos de producción tienden a aumentar debido a la disminución en la calidad del grano, mientras que, a mayores alturas, el crecimiento de las plantas se ve limitado (Figuroa-Hernández et al., 2016).

4.1.2. Temperatura

La temperatura es uno de los factores climáticos que más influye en la fisiología del cafeto. El rango óptimo se sitúa entre los 17 y 26 °C. Temperaturas inferiores a 16 °C pueden causar quemaduras en los brotes, mientras que temperaturas superiores a 27 °C incrementan el riesgo de deshidratación de la planta y reducen la fotosíntesis [Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2019].

4.1.3. Precipitaciones

El cafeto requiere precipitaciones anuales entre 1 000 y 3 000 mm (Venegas et al., 2018). Excesos de lluvia pueden fomentar el desarrollo de hongos y dificultar la floración, mientras que una precipitación insuficiente limita el crecimiento de las plantas y el desarrollo de los frutos. Un período breve de sequía es favorable para la floración (Arcila-Pulgarín & Jaramillo-Robledo, 2003; Figuroa-Hernández et al., 2016).

4.1.4. Humedad relativa

El rango de humedad relativa óptimo se encuentra entre el 70 y el 85 % (Venegas et al., 2018). Períodos prolongados con alta humedad pueden favorecer la proliferación de plagas y enfermedades (IICA, 2019).

4.1.5. Viento

El viento desempeña un papel importante en el cultivo de café, ya que su intensidad influye en la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas. Corrientes de aire fuertes pueden secar y dañar hojas, brotes y botones florales. Para mitigar su impacto, se recomienda sembrar árboles de sombra en los cafetales (IICA, 2019). Se considera que velocidades superiores a 20-30 km/h pueden causar daños físicos y fisiológicos en el cafeto (Figuroa-Hernández et al., 2016).

4.1.6. Topografía

Es preferible cultivar café en terrenos con pendientes inferiores al 40 %, ya que pendientes más pronunciadas favorecen la erosión del suelo y la pérdida de nutrientes, además de encarecer las labores agrícolas (IICA, 2019).

4.1.7. Luminosidad

El desarrollo óptimo del cafeto se logra con una exposición solar de entre cuatro y siete horas diarias (IICA, 2019).

4.1.8. Características físico-químicas

Según Venegas et al. (2018), las condiciones edáficas óptimas para el cultivo del café incluyen:

- **Propiedades físicas:** Textura media o limosa con estructura granular y una profundidad efectiva mayor a 50 cm.
- **Propiedades químicas:** Un contenido de materia orgánica superior al 8 % y nitrógeno mayor al 3 %. Los niveles adecuados de macronutrientes son de 0,2 a 0,7 meq/100g para el potasio y de 6 a 14 ppm para el fósforo. El pH ideal es de 6,5.

4.2. Origen y distribución del café

El café es originario de África y pertenece al género *Coffea*, que incluye más de 100 especies dentro de su gran diversidad botánica. Según la región de origen y las condiciones climáticas, se desarrollaron diversas variedades de cafetos con características genéticas específicas, como el porte y la forma de la planta, el tamaño y color del fruto, la resistencia a enfermedades, la tolerancia a plagas, el sabor de la bebida, la adaptabilidad, y la productividad, entre otros atributos. De este amplio grupo, solo dos especies se cultivan comercialmente: *Coffea arabica*, que comprende diversas variedades de arábica, y *Coffea canephora*, que incluye diferentes grupos de robusta (Velásquez, 2019).

4.2.1. Principales especies y sus características

4.2.1.1. Café arábigo.

Coffea arabica es la especie de café más cultivada a nivel mundial. Esta especie se originó en las tierras altas de Etiopía, en altitudes que varían entre los 1 350 y 2 000 msnm. Se trata de un arbusto o árbol pequeño, con hojas lustrosas de tamaño relativamente reducido. Las hojas tienen una longitud promedio de 12 a 15 cm y un ancho de aproximadamente 6 cm. Su forma es ovalada o elíptica, con ápices acuminados y bases cortas y agudas. Las flores

de *Coffea arabica* son fragantes, de color blanco o crema, y pueden ser subsésiles o pediceladas. Esta especie tiene una tasa de autofecundación alta, que oscila entre el 90 y el 95 %. Esta característica facilita la obtención de poblaciones homogéneas mediante reproducción sexual. El tamaño promedio de sus semillas varía entre 8,5 y 12,7 mm de largo, lo que contribuye a su calidad y características comerciales (Cortina et al., 2013).

Geisha. Planta de tamaño alto, nativa de Geisha, Etiopía. Esta variedad fue introducida inicialmente en Kenia en 1936, y más tarde se expandió a Tanganyca (actual Tanzania) y a Costa Rica (Velásquez, 2019). Las características principales de la planta Geisha son las siguientes:

- Presenta cierta resistencia a la roya del café.
- Es una planta de gran tamaño, alcanzando más de tres metros de altura. Las bandolas superiores forman un ángulo de 45° respecto al eje principal, mientras que las bandolas de la parte media y baja forman un ángulo de 60° con respecto a dicho eje.
- Las hojas son lanceoladas, estrechas, y de un verde ligeramente intenso.
- Los brotes nuevos son de color de verde.
- Los entrenudos son abiertos, lo que se traduce en una baja producción.
- Los frutos son de color rojo y tienen una maduración tardía.
- Se adapta mejor a climas fríos, especialmente por encima de los 1 400 msnm.
- Produce granos de tamaño mediano a grande y de forma alargada.



Fuente: Velásquez (2019).

Figura 1. Variedad Geisha.

4.2.1.2. Café robusta.

Coffea canephora, también conocido como robusta. Esta especie tiene su origen en los bosques ecuatoriales de África, en altitudes que varían entre 0 y 1 000 msnm. La planta de *Coffea canephora* es un árbol o arbusto vigoroso, con una copa ancha, hojas grandes y

corrugadas, y frutos pequeños. Las flores son de color blanco, a veces con un ligero tinte rosa, y se agrupan en racimos biaxiales, sésiles, con o sin brácteas hojosas. La corola de las flores tiene entre cinco y siete lóbulos. Las bayas son elipsoides, de aproximadamente 8 a 16 mm, y presentan estrías cuando están secas (Cortina et al., 2013).

4.2.2. Fase de desarrollo vegetativo del café

El cafeto es un árbol de crecimiento continuo, cuyo tallo se alarga en altura mientras que las ramas se desarrollan lateralmente desde el eje central. Las ramas laterales, conocidas como primarias, comienzan a formarse entre el sexto y el décimo par de hojas. La inserción de estas ramas en el tallo principal da lugar a los nudos del eje central y a los entrenudos, lo que contribuye a la formación de una planta de forma aproximadamente piramidal o cónica. El desarrollo vegetativo del cafeto se puede dividir en tres etapas: germinación hasta el trasplante (aproximadamente dos meses), almácigo (5-6 meses) y siembra definitiva hasta la primera floración (11 meses). A partir de este punto, las fases de crecimiento vegetativo y reproductivo ocurren simultáneamente (Arcila, 2007).

4.3. Suelo

Desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie terrestre y actúa como soporte para la vida vegetal y otros organismos. Por esta razón, es uno de los elementos más esenciales para el adecuado desarrollo de los cultivos (Lozano, 2018; Moreno et al., 2015).

De acuerdo con INTAGRI (2017), la capacidad de un suelo para producir cultivos no depende únicamente de su contenido nutricional, sino también de sus propiedades físicas. El crecimiento de la parte aérea de la planta está directamente relacionado con el desarrollo de la raíz, el cual se ve influenciado por el equilibrio entre la humedad y la aireación del suelo.

4.4. Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas de un suelo son parte de un conjunto de características esenciales que favorecen el desarrollo de la vida vegetal. Estas propiedades están relacionadas con las partículas individuales de arena, limo y arcilla, así como con la forma en que estas partículas se organizan. Incluyen también aspectos como la compactación o densidad, la porosidad, la temperatura y el color del suelo (Vera, 2020).

4.4.1. Textura del suelo

La textura del suelo es una propiedad que indica el contenido de partículas de arena, limo y arcilla presentes en él. Además, influye en otras propiedades como la densidad

aparente, la porosidad y, por lo tanto, en la circulación y almacenamiento de fluidos (agua y aire) en el suelo (Camacho-Tamayo et al., 2017).

Las partículas de arena tienen diámetros que oscilan entre 0,05 y 2,00 mm, lo que genera un gran volumen de poros entre ellas, favoreciendo la circulación del aire y el drenaje del agua. Las partículas de limo tienen diámetros entre 0,002 y 0,05 mm, y los suelos formados principalmente por limo tienen una notable capacidad para retener agua disponible para el desarrollo vegetal. Por su parte, las partículas de arcilla, con diámetros menores a 0,002 mm, poseen la capacidad de retener agua frente a la fuerza de gravedad (Fertilab, 2010).

4.4.2. Estructura del suelo

La estructura del suelo se refiere al arreglo y organización de las partículas que lo constituyen (Giménez, 2013). Al hablar de partículas, no nos referimos únicamente a las fracciones granulométricas (arena, limo, arcilla), sino también a los agregados o unidades estructurales que se forman por la combinación de estas fracciones. Así, entendemos por partícula toda unidad constituyente del suelo, ya sea primaria (arena, limo, arcilla) o secundaria (agregado o unidad estructural). Estos arreglos necesariamente incluyen espacios porosos (Rucks et al., 2004).

La estructura del suelo tiene un impacto directo en la aireación, la circulación del agua, la conducción térmica, el desarrollo de las raíces y la resistencia a la erosión (López, 2016).

Koni (2006) señala que las labores realizadas en el suelo pueden modificar su estructura. Además, destaca que la materia orgánica juega un papel crucial en el mantenimiento de una buena estructura del suelo. Por esta razón, incorporar restos vegetales, estiércoles o abonos orgánicos resulta altamente beneficioso para el suelo.

4.4.3. Densidad real

La densidad real (D_r), también conocida como densidad de sólidos o densidad de las partículas, se define como la relación entre la masa total de los sólidos y el volumen de los mismos, excluyendo los poros. Se expresa en g cm^{-3} o t m^{-3} . Para realizar el análisis granulométrico, se suele admitir un valor convencional de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, ya que la densidad real tiende a ser aproximadamente constante (Giménez, 2013).

La densidad real viene dada por la siguiente expresión:

$$D_r = \frac{M_s}{V_s}$$

Donde M_s es la masa de sólidos y V_s es el volumen de sólidos de un suelo (Ingaramo et al., 2007).

4.4.4. Densidad aparente

La densidad aparente del suelo (D_a) se define como la relación entre la masa del suelo seco y el volumen total del mismo, incluidos los poros. Se expresa en g cm^{-3} o t m^{-3} y se determina en laboratorio. La D_a es una propiedad del suelo de gran importancia, ya que permite estimar la porosidad total, convertir la humedad gravimétrica en volumétrica, calcular el peso de la capa arable, determinar las necesidades de riego, entre otros. Además, se utiliza como indicador del grado de compactación del suelo y de las limitaciones para el desarrollo de las raíces (Novillo et al., 2018).

La densidad aparente se calcula con la siguiente fórmula:

$$D_a = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_s + V_a + V_w}$$

Donde M_s es la masa de sólidos y V_t es el volumen total que viene dado por la sumatoria del volumen de sólido (V_s), el volumen de aire (V_a) y el volumen de agua (V_w) que posee un suelo (Ingaramo et al., 2007).

Según Gilsanz et al. (2013), la D_a está directamente vinculada con otras propiedades físicas del suelo. La reducción de la densidad aparente aumenta la permeabilidad, lo que mejora la disponibilidad de agua para las plantas. Además, mencionan que el uso de abonos orgánicos, como el estiércol, compost o los lodos urbanos, constituye una fuente de materia orgánica que puede mejorar la estructura del suelo, reduciendo la erosión o degradación del recurso.

Los niveles de densidad aparente se detallan en la Tabla 1, la cual proporciona información clave sobre la calidad del suelo según los límites establecidos para su uso en la agricultura.

Tabla 1. Nivel de densidad aparente.

Densidad aparente (D_a)	
Rangos g/cm^3	Nivel de D_a
$\geq 1,6$	Muy alta
1,4 – 1,6	Alta
1,2 – 1,4	Media
$\leq 1,2$	Baja

Fuente: Tomado de Alegre et al. (1986); Cassel y Lal (1992), citado por Nieto (2019).

4.4.5. Porosidad

La porosidad del suelo se refiere al volumen total de espacio poroso o al número de poros presentes entre las partículas sólidas (orgánicas e inorgánicas) del suelo. Los valores de porosidad varían según la estructura, textura y grado de compactación (densidad aparente) del suelo, y estos espacios porosos están ocupados en diferentes proporciones por las fases líquida y/o gaseosa (Novillo et al., 2018).

Un suelo ideal presenta 50 % de porosidad, los poros grandes (0,01-0,05 mm) ocupan el 33 % de este espacio y los poros medianos (0,0002-0,01 mm) el 66 % restante, ya que los poros pequeños (< 0,0002 mm) retienen agua no disponible para las raíces de las plantas. La porosidad mínima para un correcto desarrollo de la planta en suelos francos es de 35 % y en suelos arcillosos es de 45 %. (Fertilab, 2010, p. 2)

El valor de porosidad o espacio poroso (Pt) se calcula con la siguiente expresión:

$$Pt (\%) = 1 - \frac{Da}{Dr} * 100$$

La reducción de la porosidad en un suelo agrícola perjudica significativamente la circulación y el almacenamiento normal de aire y agua, elementos esenciales para el desarrollo adecuado de los cultivos (Tesouro et al., 2017).

En la Tabla 2 se presentan los rangos de porosidad en porcentaje, los cuales indican la calidad de un suelo en cuanto a su porosidad.

Tabla 2. Clasificación de la calidad de suelo en función a su porosidad.

Porosidad		Calidad
Rangos %		
50		Ideal
40 – 50		Mediana
40		Baja

Fuente: Tomado de Alegre et al. (1986), citado por Nieto (2019).

4.4.6. Relación entre la densidad aparente y la porosidad

La densidad aparente (Da) refleja el estado del espacio poroso del suelo, indicando su capacidad de aireación y permeabilidad, factores clave para el desarrollo de las raíces y el crecimiento de los cultivos, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Relación entre Da (g cm⁻³) y porosidad (%).

Da	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Porosidad	63,0	59,0	56,0	52,0	48,0	45,0	41,0	37,0	33,0	30,0

Los valores de densidad aparente inferiores a 1 g cm⁻³ se obtienen normalmente en suelos orgánicos o suelos derivados de cenizas volcánicas (Heredia, 2015).

4.5. Contenido de agua en el suelo

El contenido de agua en el suelo es una propiedad altamente variable, que depende del equilibrio entre la entrada (infiltración) y la salida (evaporación, absorción por las raíces y drenaje) de agua en el medio poroso (Bautista, 2022).

Duarte-González (2021) señala que los dos parámetros más importantes para describir el estado de disponibilidad de agua en el suelo son el contenido de agua y el potencial total de agua. Según Duarte-González, el contenido de agua se refiere a la fracción del suelo que está ocupada por agua, la cual puede medirse en términos de masa por

volumen; mientras que el potencial total de agua se refiere a la energía que el agua posee en el suelo.

4.6. Fuerzas de retención del agua en el suelo

Pachés (2019) indica que el movimiento del agua en el suelo está regulado por su energía, que se expresa en unidades de potencial. El potencial hídrico se define como el trabajo necesario para transferir, de forma reversible e isotérmica, una unidad (volumen, masa, peso) de agua pura desde el estado de referencia (e.d.r.) hasta el suelo en el punto considerado. Este potencial se representa con el signo Ψ , p.e. $\Psi_{e.d.r.} = 0$. Según Pachés, el agua en su estado de referencia posee las siguientes propiedades:

- Libre, sin interacción con una superficie sólida.
- Pura, sin ninguna solución disuelta.
- Sujeta a presión atmosférica.
- Ubicada en un nivel específico.
- A la misma temperatura que el agua del suelo.

El potencial hídrico total en el suelo (Ψ_T) es la suma de varios componentes: potencial mátrico o matricial (Ψ_m), potencial osmótico (Ψ_o), potencial gravitatorio (Ψ_g) y potencial de presión (Ψ_p) (Díaz, 2015).

$$\Psi_T = \Psi_m + \Psi_o + \Psi_g + \Psi_p$$

Las unidades de potencial hídrico pueden expresarse en: $J\ kg^{-1}$, cbar, MPa, cm y m. Díaz (2015) y Pachés (2019) describen cada componente del potencial hídrico de la siguiente manera:

4.6.1. Potencial matricial

El Ψ_m representa el grado de retención de agua en el suelo, que se debe a la matriz porosa del mismo y es el producto de las fuerzas de adhesión y cohesión que se presentan en él. Estas fuerzas atraen y retienen el agua, reduciendo su energía potencial por debajo de la del agua libre. Por lo tanto, el valor es siempre negativo, ya que la presión que genera se opone a la eliminación del agua del suelo. Cuanto más seco esté el suelo (es decir, cuando no esté saturado), más negativo será el potencial matricial y mayor será la presión necesaria para extraer el agua. En contraste, en un suelo saturado, el valor será cero (ver Figura 2).

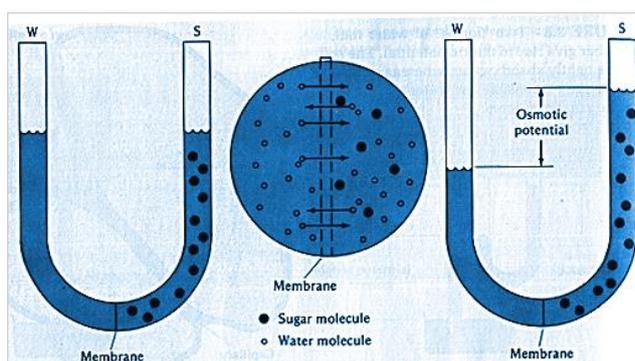
Suelo No Saturado	x A	$\Psi_m^A < 0$
Suelo Saturado	x B	$\Psi_m^B = 0$

Fuente: Pachés (2019).

Figura 2. Potencial matricial en el suelo.

4.6.2. Potencial osmótico

El Ψ_o es el componente del potencial hídrico que resulta de la presencia de sales disueltas en el agua, las cuales provocan una caída de potencial. La diferencia entre un punto de este potencial y otro en el suelo provoca el movimiento de agua entre ambos puntos. La presencia de sales cambia la estructura del agua de hidratación y las moléculas de agua pierden energía libre. La diferencia de potencial osmótico entre dos puntos del suelo genera el movimiento del agua entre esos puntos. Las sales alteran la estructura del agua de hidratación, lo que provoca que las moléculas de agua pierdan energía libre. Debido a que el soluto reduce la energía potencial de las moléculas de agua, el potencial osmótico siempre es negativo ($\Psi_o < 0$). En el caso del agua pura, se considera que su potencial osmótico es cero ($\Psi_o = 0$). Este componente es esencial para estimar el esfuerzo que las raíces de las plantas deben realizar para extraer humedad del suelo (ver Figura 3).



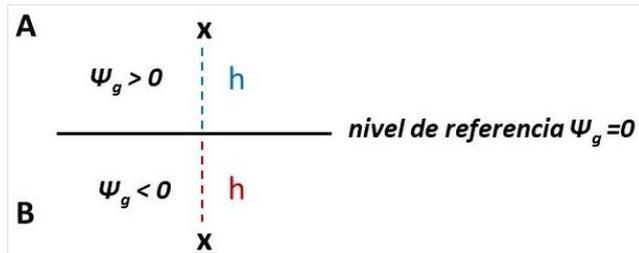
Fuente: Brandy (1984).

Figura 3. Proceso de osmosis.

4.6.3. Potencial gravitacional

El Ψ_g se debe a la fuerza gravitacional, y se define como el trabajo necesario para elevar un cuerpo desde el nivel de referencia. El potencial gravitacional del agua en un punto

determinado del suelo está condicionado por la altura de ese punto respecto al nivel de referencia. Si el nivel de referencia se encuentra por encima del punto considerado, el potencial gravitatorio será negativo ($\Psi_g < 0$). En cambio, si el nivel de referencia está por debajo de dicho punto, el potencial gravitacional será positivo ($\Psi_g > 0$) (ver Figura 4).



Fuente: Pachés (2019).

Figura 4. Signo del potencial gravitacional.

4.6.4. Potencial de presión

El Ψ_p se refiere a la presión ejercida por la columna de agua sobre el punto del suelo considerado. En regiones no saturadas, el valor de Ψ_p es cero. Sin embargo, en regiones por debajo del nivel freático (es decir, en regiones saturadas), el valor de Ψ_p es positivo ($\Psi_p > 0$), debido a que la presión hidrostática en estas áreas es mayor que la presión atmosférica.

4.7. Curva de retención del agua del suelo

La curva de retención del agua del suelo, también conocida como curva característica de humedad del suelo o curva pF, expresa la relación entre la humedad volumétrica (θ_v) y su potencial matricial (Ψ_m). Esta curva refleja la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión, siendo esta relación dependiente de factores relacionados con la porosidad del suelo (Bejar et al., 2020). “Matemáticamente la curva pF representa la relación entre la carga de presión negativa (hPa) y el contenido de humedad del suelo (%.-Vol.)” (Balcázar & Valarezo, 2010, p. 28).

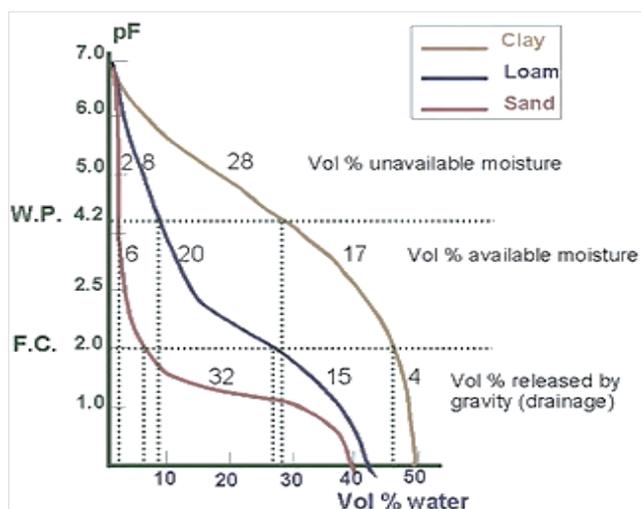
$$C = \frac{\delta\phi}{\delta\theta}$$

Debido que la energía necesaria para extraer el agua del suelo crece exponencialmente, mientras que el contenido de humedad (θ_v) disminuye linealmente, la relación se representa con mayor facilidad utilizando el logaritmo de la tensión de humedad del suelo, expresado en unidades de centímetros de columna de agua (cm.c.a.), lo que se denomina pF (donde “p” representa el potencial y “F” la energía libre). De esta manera, si se redondea $1 \text{ atm} = 1 \text{ bar} = 1 \text{ 000 cm.c.a.}$; entonces $pF = 3,0$. La curva pF proporciona la siguiente información clave (L. Valarezo et al., 2020):

- El volumen total de poros y la distribución de los poros por rangos de tamaño.

- La capacidad de aireación del suelo para las raíces y el espacio poroso drenable.
- La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, a partir de los cuales se calcula el volumen de agua aprovechable para las plantas.
- El espacio poroso físicamente inerte del suelo.
- La condición física del suelo para el crecimiento de las plantas (fertilidad física).

En la Figura 5, se muestra las curvas de retención de humedad del suelo.



Fuente: Portal de suelos de la FAO

Figura 5. Curvas de retención de humedad del suelo.

4.7.1. Puntos importantes de la curva de retención de agua del suelo

4.7.1.1. Saturación.

El punto de saturación del suelo (PS) es el contenido máximo de agua que el suelo puede retener, expresado en porcentaje. Este dato se obtiene en laboratorio y refleja los valores de capacidad de retención de agua en función del tipo de suelo. Para suelos arenosos, el PS suele ser cercano o inferior al 30 %, mientras que para suelos muy arcillosos o con altos porcentajes de materia orgánica, el PS puede alcanzar hasta el 60 % (Fertilab, 2010). A partir de este valor de saturación, es posible estimar otros puntos cruciales para la disponibilidad de agua en el suelo, tales como la humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Izquierdo et al., 2011).

4.7.1.2. Capacidad de campo.

La capacidad de campo (CC) se refiere a la cantidad de agua que el suelo puede retener después de haber sido saturado y dejado drenar libremente durante un período de 24 a 48 horas. En este proceso, el agua llena los macroporos del suelo, los cuales permiten que el agua se mueva hacia capas inferiores debido a la acción de la gravedad. Los microporos,

por su parte, se llenan principalmente de agua, mientras que los macroporos más grandes se llenan tanto de agua como de aire. El punto de capacidad de campo se encuentra cuando la succión del agua es de 1/3 bar, lo que significa que el suelo retiene agua suficiente para que las plantas puedan acceder a ella sin que se produzca un drenaje adicional significativo. Las plantas generalmente necesitan ejercer una succión de hasta 15 bares para poder extraer agua de los microporos del suelo (López, 2016). La capacidad de campo se estima por el porcentaje en volumen de agua presente en el suelo respecto al volumen de suelo seco (Tamara & Ducuara, 2016). Este dato es esencial para comprender la disponibilidad de agua para los cultivos en un suelo determinado.

La CC se puede calcular con la siguiente expresión:

$$CC = (PS/1,84) - 0,48$$

Donde CC es la humedad a capacidad de campo, en % y PS es el punto de saturación del suelo, en %.

4.7.1.3. Punto de marchitamiento permanente.

El punto de marchitamiento permanente (PMP) es una propiedad del suelo que describe el contenido de agua remanente en el suelo cuando el cultivo ha absorbido toda el agua utilizable. En este punto, aunque sigue existiendo una cierta cantidad de agua en el suelo, esta queda tan fuertemente retenida por las fuerzas de cohesión y adhesión que no puede ser extraída por las raíces de las plantas (M. García et al., 2012). Cuando el suelo alcanza el PMP, las plantas se encuentran en un estado permanentemente marchito, lo que significa que no pueden recuperar su turgencia ni siquiera si se les coloca en un ambiente saturado donde el agua casi no se consume, como durante la noche. Esto ocurre porque la cantidad de agua remanente en el suelo está tan fuertemente adherida que es inaccesible para las plantas, resultando en su muerte o en daños irreversibles (FAO, s.f.). El punto de marchitamiento permanente se encuentra generalmente alrededor de los -15 bares (pF 4,2), aunque este valor puede variar dependiendo del tipo de planta, ya que algunas especies tienen la capacidad de extraer agua incluso en condiciones de mayor sequedad (López, 2016). Este punto es crítico para la gestión agrícola, ya que marca el límite de la agua disponible para los cultivos. Es importante evitar que los suelos lleguen a este punto en condiciones normales de cultivo, ya que implica estrés hídrico severo y riesgo de pérdida de plantas.

El PMP se calcula con la fórmula:

$$PMP = CC \times 0,595$$

Donde PMP es la humedad a punto de marchitamiento permanente, en % y CC es la humedad a capacidad de campo, en %.

4.7.1.4. Humedad equivalente.

La humedad equivalente (HE) es una propiedad del suelo que busca reflejar su máxima capacidad de retención de agua en condiciones de laboratorio. Este valor es importante para comprender cuánto agua puede mantener un suelo después de haber sido saturado, y se obtiene mediante la aplicación de una fuerza específica sobre el suelo. La HE se mide al someter una muestra de suelo saturada a una fuerza equivalente a 1 000 veces la gravedad, lo que representa una presión de 0,3 atmósferas o 0,03 MPa (Gudelj et al., 2018).

4.8. Condiciones físicas del suelo para el crecimiento de las plantas

Leanne (2020) destaca la importancia de la condición física del suelo como un factor clave en su capacidad de soporte y en su efectividad para promover el crecimiento vegetal. La condición física influye directamente en varios aspectos como la penetración de las raíces, la circulación de aire, la retención de agua, el drenaje, la plasticidad y la preservación de nutrientes.

Un indicador útil para evaluar la calidad física del suelo es el análisis del reparto de los volúmenes de las tres fases del suelo a capacidad de campo ($pF = 2,0$ ó $2,52$). Para realizar esta evaluación, es necesario conocer los volúmenes porcentuales de los siguientes componentes:

1. Capacidad de aireación: Los poros con diámetro superior a $30 \mu m$);
2. Agua aprovechable (poros de diámetro de $0,2$ a $30 \mu m$); y,
3. Volumen físicamente inerte del suelo (volumen de poros inservibles $< 0,2 \mu m$).

Para facilitar la interpretación de estos valores, se utilizan diagramas triangulares, donde se delimitan cinco zonas que reflejan las condiciones físicas del suelo: muy pobre (I), pobre (II), media (III), buena (IV) y muy buena (V). Véase Anexo 1 (L. Valarezo et al., 2020).

4.8.1. Capacidad de aireación

L. Valarezo et al. (2020) mencionan:

El volumen que resulta de la diferencia entre el contenido de agua a saturación ($pF = 0$) y el contenido de agua a capacidad de campo ($pF = 2,0$ ó $2,52$), corresponde a la capacidad de aireación del suelo: $CA (\% \theta_v) = \text{Satur. } (\% \theta_v) - CC (\% \theta_v)$. (p. 70)

Es decir, los poros del suelo que están ocupados por aire cuando el suelo alcanza su capacidad de campo constituyen la porosidad de aireación. Este parámetro es crucial para el movimiento del oxígeno hacia las raíces y es esencial en los cálculos de drenaje. Los suelos con menos del 10 % de porosidad de aireación experimentan una renovación de oxígeno muy lenta, lo que afecta negativamente a la mayoría de las plantas. En cambio, cuando la

porosidad de aireación oscila entre 10 y 15 %, las condiciones son favorables para el desarrollo de la zona radicular de las plantas.

4.8.2. Agua aprovechable

L. Valarezo et al. (2020) explican que el volumen de agua aprovechable en el suelo se calcula como la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo ($pF = 2,0$ o $2,52$) y el contenido de agua en el punto de marchitez permanente ($pF = 4,2$). Este volumen corresponde al agua aprovechable (AA) y se expresa de la siguiente manera: $AA (\% \theta_v) = CC (\% \theta_v) - PMP (\% \theta_v)$, la misma que constituye la solución del suelo y es la principal fuente de agua para el desarrollo de las plantas.

La textura del suelo afecta tanto la cantidad de humedad retenida en un suelo drenado hasta alcanzar la capacidad de campo, como la cantidad de agua que está disponible para las plantas. La humedad útil del suelo, que constituye el agua aprovechable por las plantas, se puede determinar en el laboratorio mediante las curvas de retención de humedad del suelo (López, 2016).

4.8.3. Volumen inútil de poros

También denominado volumen físicamente inerte (VFI), se refiere al contenido volumétrico de agua en el punto de marchitez permanente (PMP). Este volumen corresponde a los poros con un diámetro menor a $0,2 \mu m$, los cuales no aportan ni aire ni agua a las raíces (Morocho & Chilllogallo, 2010).

4.9. Compactación del suelo

Este fenómeno es una de las principales causas de degradación física de los suelos, ya que altera su estructura y reduce su porosidad. La compactación excesiva del suelo tiene efectos adversos sobre la emergencia de las plántulas y el desarrollo radicular de los cultivos. Provoca una disminución en la difusión del aire, incrementa la densidad aparente y aumenta el riesgo de escurrimiento superficial del agua, debido a la disminución de la infiltración (Tesouro et al., 2017).

4.10. Contenido de materia orgánica

González et al. (2009) y USDA (1996), citado por Magallanes (2018), afirman que el contenido de materia orgánica mejora la estructura del suelo, reduce su compactabilidad, favorece la formación y estabilidad de agregados, aumenta la porosidad total, reduce la densidad aparente, mejora la actividad biológica del suelo y contribuye a una mayor retención de humedad. Además, incrementa los límites de consistencia del suelo, ampliando el intervalo

de humedad en el cual el suelo puede ser trabajado. El material parcialmente descompuesto y altamente humidificado aumenta la resistencia del suelo a la compactación.

La materia orgánica desempeña un papel crucial en la mejora de las condiciones físicas del suelo, favoreciendo la retención de humedad y sirviendo como el principal sustrato para el desarrollo de microorganismos, los cuales la descomponen y la convierten en una rica fuente de nutrientes para el café. Los suelos aptos para el cultivo de café deben tener un contenido de materia orgánica superior al 8 % (Vanegas, 2016).

4.10.1. Enmiendas orgánicas

La adición de enmiendas orgánicas aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo, lo que mejora sus propiedades físicas, tales como la estructura, la porosidad, la retención de agua y la regulación de temperatura. Además, favorece las propiedades químicas del suelo, ya que la materia orgánica tiene la capacidad amortiguadora, es decir, la propiedad de regular la acidez o alcalinidad del suelo. Todas las enmiendas orgánicas ejercen un impacto positivo y extenso sobre la microflora nativa de la rizosfera y el tejido radical (Ayuso, 2015).

4.10.2. Abonos orgánicos

A diferencia de las enmiendas orgánicas, cuyo propósito principal es mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo, los abonos orgánicos tienen como función primordial aportar nutrientes al suelo para aumentar el rendimiento de los cultivos. Estos provienen de materiales orgánicos de origen animal o vegetal (Borrero, s.f.). Los abonos orgánicos ofrecen diversos beneficios, entre los que destacan: la mejora de la actividad biológica del suelo, especialmente con los organismos que transforman la materia orgánica en nutrientes disponibles para las plantas; el aumento de la capacidad del suelo para absorber y retener humedad; la mejora de la porosidad del suelo, lo que facilita el crecimiento radicular; la mejora de la capacidad de intercambio catiónico del suelo, ayudando a liberar nutrientes esenciales para las plantas; y la facilitación de la labranza del suelo (Gómez & Vásquez, 2011). Los fertilizantes orgánicos contribuyen tanto con materia orgánica al suelo como con nutrientes esenciales, tales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y azufre, entre otros (Cabrera, 2019).

4.10.2.1. Nutrisano.

Es un producto de elevado rendimiento, elaborado con residuos vegetales y estiércoles animales seleccionados y compostado, que aporta con macro y micro elementos esenciales para los cultivos. Su alto contenido de materia orgánica no solo mejora las propiedades físicas del suelo, sino también sus características químicas y biológicas. El

proceso de descomposición controlada asegura la calidad del producto final, que presenta una densidad aparente de 0,6 g cm³ (Prefectura de Loja, 2018).

Tabla 4. Composición química del nutrisano.

Determinación		Unidad	Resultados
Nombre			
Nitrógeno		%	1,75
Fosforo expresado como P ₂ O ₅		%	1,52
Potasio expresado como K ₂ O		%	2,42
Calcio expresado como CaO		%	6,62
Magnesio expresado como MgO		%	0,79
Materia orgánica		%	65,75
pH		U.pH	7,50
Conductividad		Ms/cm	7,30

Fuente: Tomado de Prefectura de Loja (2018), citado por Sarango (2023).

4.11. Hongos micorrízicos arbusculares

El término "micorriza", que significa "hongo-raíz", fue introducido en 1885 por el botánico alemán Frank para describir la presencia de raíces de plantas vasculares infectadas por hongos. Las micorrizas son organismos simbióticos que se asocian con la mayoría de las plantas (Sánchez, 2017). Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) han coexistido y coevolucionado con las plantas durante al menos 450 millones de años (Ek Chim, 2019), y todos los HMA conocidos se han agrupado dentro del *Phylum Glomeromycota* (Lalangui, 2018). Actualmente, los HMA se distribuyen en 11-14 familias y comprenden entre 18 y 29 géneros (Stürmer et al., 2013).

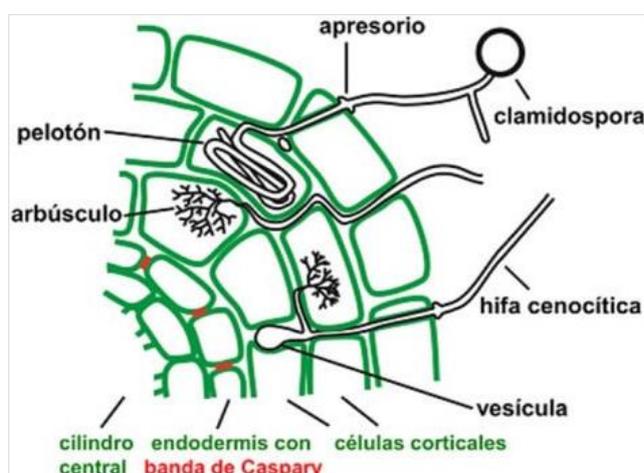
Schüßler y Walker (2010) propusieron la clasificación taxonómica más reciente de los HMA, basada principalmente en la morfología de sus estructuras micorrízicas y en la identificación molecular, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de los hongos formadores de micorrizas.

Reino	División	Clase	Orden	Familia	Género
Fungi	<i>Glomeromycota</i>	<i>Glomeromycetes</i>	<i>Glomerales</i>	<i>Glomeraceae</i>	<i>Glomus</i>
					<i>Funnelliformis</i>
					<i>Rhizophagus</i>
					<i>Sclerocystis</i>
			<i>Diversisporales</i>	<i>Claroideoglomeraceae</i>	<i>Claroideoglomus</i>
				<i>Gigasporaceae</i>	<i>Gigaspora</i>
					<i>Scutellospora</i>
					<i>Racocetra</i>
				<i>Acaulosporaceae</i>	<i>Acaulospora</i>
				<i>Entrophosporaceae</i>	<i>Entrophospora</i>
				<i>Pacisporaceae</i>	<i>Pacispora</i>
				<i>Diversisporaceae</i>	<i>Diversispora</i>
					<i>Otospora</i>
					<i>Redeckera</i>
			<i>Paraglomerales</i>	<i>Paraglomeraceae</i>	<i>Paraglomus</i>
			<i>Archaeosporales</i>	<i>Geosiphonaceae</i>	<i>Geosiphon</i>
				<i>Ambisporaceae</i>	<i>Ambispora</i>
				<i>Archaeosporaceae</i>	<i>Archaeospora</i>

Fuente: Clasificación y taxonomía de los HMA del *Phylum Glomeromycota* adaptado de Schüßler y Walker (2010).

Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) desarrollan estructuras tanto dentro como fuera de las raíces, dependiendo de su género y especie. Las vesículas, que se forman exclusivamente dentro de las raíces, sirven como almacenamiento de reservas como glicoproteínas y lípidos. Las hifas pueden ser intra-radicales, como las "hifas infecciosas", o extra-radicales, como las "hifas de absorción". Entre las estructuras intra-radicales, destacan los arbuscúlos, que tienen una forma ramificada similar a un árbol, creados por la repetida ramificación de una hifa. En estos arbuscúlos, el hongo invagina la membrana celular de la planta sin romperla, lo que aumenta la superficie de contacto y facilita el intercambio de nutrientes entre ambos simbiosis (Carreón-Abud et al., 2016). La Figura 6 ilustra una micorriza arbuscular.



Fuente: García (2017).

Figura 6. Descripción de una micorriza arbuscular.

4.12. Materia orgánica y hongos micorrízicos arbusculares

La materia orgánica es descompuesta por la actividad de diversas especies de bacterias y hongos, que liberan nutrientes al suelo, dejándolos disponibles para que las plantas los absorban. Esta absorción puede ocurrir de dos formas: 1) directamente a través de las raíces y 2) de manera indirecta, mediante los microorganismos que forman simbiosis con las raíces, como los hongos micorrízicos. Las micorrizas arbusculares constituyen entre el 5 y el 50 % de la biomasa microbiana del suelo y son consideradas una comunidad biológica diversa y activa, fundamental para mejorar la sostenibilidad de los agroecosistemas. Estas micorrizas representan las simbiosis más relevantes en los sistemas agroecológicos (Pérez et al., 2011).

4.13. Uso de los hongos micorrízicos arbusculares en los agroecosistemas

La utilización de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la agricultura presenta un gran potencial biotecnológico, ya que facilitan la disponibilidad de nutrientes para las plantas, proporcionando a las micorrizadas una ventaja significativa sobre las plantas no micorrizadas. Existen principalmente dos métodos para manejar los HMA en la agricultura: trabajar con hongos nativos o inocular con HMA seleccionados. Sin embargo, el uso de este segundo método puede generar conflictos, ya que la inoculación con HMA seleccionados podría perturbar la acción de los hongos nativos, al tener que competir con los inoculados. A pesar de este inconveniente, la inoculación es una alternativa valiosa, especialmente en sistemas de monocultivos, donde la presencia de especies fúngicas disminuye y, por lo tanto, se requiere el aporte externo de HMA. En Chile, estudios en invernadero han evidenciado que la inoculación con HMA nativos en cultivos de pimentón ofrece resultados superiores en comparación con el uso de HMA comerciales (Barrer, 2009).

4.14. Presencia e importancia de los hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo de café

La micorrización en las raíces de los cafetos fue documentada por primera vez en 1897 (Hernández-Acosta et al., 2018). El café es un cultivo altamente micotrófico (Trejo et al., 2018), y los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) pueden mejorar su rendimiento, su crecimiento y desarrollo vegetativo (Hernández-Acosta et al., 2018). Se reconoce ampliamente que las micorrizas favorecen el crecimiento, desarrollo y nutrición del café, especialmente en suelos de baja fertilidad y alta compactación. No obstante, investigaciones recientes han revelado que su efecto positivo también se extiende a suelos de media y alta fertilidad. A pesar de estos beneficios, el uso de los HMA sigue siendo poco frecuente entre los viveristas y productores de café (Sánchez, 2017).

Las micorrizas arbusculares favorecen el crecimiento y la nutrición de las plantas de café, además de contribuir a la reducción de la competencia de malezas agresivas. Esta interacción, junto con la relación sinérgica entre las micorrizas, bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos solubilizadores de fosfatos, impulsa tanto el desarrollo de las plantas como el incremento de la concentración de fósforo (P) en sus tejidos (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2019).

4.15. Resultados de otras investigaciones

En la Estación Experimental La Argelia, Obaco (2023) realizó un estudio para evaluar el impacto de enmiendas orgánicas y hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la evolución de la macroporosidad del suelo y el crecimiento del cafeto (*Coffea arabica* L.). Se aplicaron abonos orgánicos (AO) en concentraciones de 0, 6, 8 y 10 %, combinados con HMA encapsulados en dosis de 0, 10, 20 y 30, y los tratamientos fueron evaluados durante un periodo de 90 días. El tratamiento T15, compuesto por un 10 % de AO y 20 encapsulados de HMA, demostró ser el más efectivo en términos de incremento en altura, alcanzando un aumento de 5,5 cm al final del experimento. Por el contrario, T5, que incluía un 6 % de AO sin HMA, registró el menor incremento, con solo 3,3 cm. En cuanto al número de hojas, el tratamiento T16 (10 % de AO y 30 encapsulados de HMA) destacó significativamente sobre el resto, mostrando el mayor aumento foliar. Otros tratamientos relevantes fueron T7 (6 % de AO y 20 encapsulados de HMA), T5 (6 % de AO sin HMA) y T4 (0 % de AO y 30 encapsulados de HMA), que incrementaron en 4 hojas respecto al testigo, el cual solo alcanzó un aumento de 3 hojas. Respecto al diámetro del tallo, los tratamientos T7 y T6, ambos con 6 % de AO y 20 y 10 encapsulados de HMA, respectivamente, registraron los mejores resultados, con un incremento de 1,3 mm. Sin embargo, estos valores fueron comparables a los observados en el tratamiento testigo.

Calderón y Loján (2022) desarrollaron una investigación en la parroquia San Pedro de Vilcabamba, provincia de Loja, con el objetivo de analizar el impacto de distintas combinaciones de microorganismos y vermicompost en el crecimiento del cultivo de café (*Coffea arabica* L.). Se emplearon seis tratamientos: T1 (vermicompost solo), T2 (vermicompost + hongos micorrízicos arbusculares), T3 (vermicompost + rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal), T4 (vermicompost + hongos micorrízicos arbusculares + rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal), T5 (vermicompost esterilizado) y un control sin tratamiento. A lo largo de cinco meses, se midieron variables como la altura de las plantas, el diámetro del tallo, el número de hojas, el porcentaje de colonización micorrízica y el peso seco de las raíces. Entre los tratamientos, T5 (vermicompost esterilizado) demostró ser el más efectivo, registrando los mayores incrementos en altura y peso seco. A los 62 días, las plantas tratadas con T5 alcanzaron una altura de 19,42 cm, que aumentó a 26,5 cm a los 133 días.

Asimismo, al final del periodo de evaluación (175 días), las plantas del tratamiento T5 presentaron el mayor peso foliar, alcanzando 5,5 g, en marcado contraste con el control, que mostró el valor más bajo de 2,25 g.

Hernández-Acosta et al. (2018) evaluaron el impacto de dos inóculos micorrízicos en el crecimiento de cuatro variedades de café (*Coffea arabica* L.): Zac-19, una mezcla de tres especies de hongos, y *Rhizophagus aggregatus*, un inóculo mono-específico. Las plántulas fueron inoculadas desde la fase de semilla y mantenidas en vivero durante 11 meses, tiempo en el que se analizaron parámetros como altura, área foliar, volumen radicular y peso seco. El inóculo Zac-19 mostró una eficiencia significativamente superior al testigo, con incrementos del 198 % en altura, 676 % en área foliar, 910 % en volumen radicular y 1 063 % en peso seco. Por otro lado, aunque *R. aggregatus* obtuvo resultados inferiores en comparación con Zac-19, también generó mejoras notables en la mayoría de las variables medidas. La única excepción fue la altura, donde este inóculo no logró superar al testigo.

Rodríguez (2001) llevó a cabo un estudio en vivero para evaluar los efectos del biofertilizante Mycoral® en plántulas de café (*Coffea arabica* L.) de la variedad 'Lempira'. El experimento incluyó la combinación de distintos sustratos, métodos de siembra y la inoculación con micorrizas. A los 85 días después de la siembra, Mycoral® promovió incrementos significativos en el peso seco (25-51 %), la altura de las plantas (10-20 %) y la cantidad de raíces secundarias (40-50 %), mostrando una mayor efectividad en bandejas multicelda. En contraste, en almácigos, el biofertilizante favoreció un aumento del 35-50 % en la longitud de la raíz pivotante. Transcurridos ocho meses desde la inoculación, las plantas tratadas con Mycoral® evidenciaron mejoras superiores al 20 % en altura, grosor del tallo y longitud radicular. Además, el volumen de raíz y el peso total prácticamente se duplicaron en comparación con las plantas no tratadas.

Poma y Robles (2023) realizaron un estudio en vivero para analizar el efecto de las micorrizas en el crecimiento de cafetos (*Coffea arabica* var. Caturra) en Chanchamayo, Junín. Se implementaron cinco tratamientos de inoculación con esporas de micorrizas (EM) y se evaluaron indicadores de desarrollo aéreo y radicular a los 90 días. El tratamiento T5, con una dosis de 20 g/planta, destacó por alcanzar los valores más altos en altura (30,65 cm), diámetro del tallo (2,95 mm), número de hojas (9), peso fresco (22,48 g) y peso seco (3,60 g), evidenciando la influencia positiva de la inoculación micorrízica. En lo que respecta al crecimiento radicular, los tratamientos T5 y T4 (15 g/planta) obtuvieron las mayores longitudes de raíz (21,05 cm) y pesos secos radiculares (1,93 g), presentando diferencias significativas respecto a los demás tratamientos.

Ricárdez- Pérez et al. (2020) estudiaron los efectos de la vermicomposta y el hongo micorrízico *Rhizophagus intraradices* en la actividad microbiana, el crecimiento y la nutrición de plántulas de cacao (*Theobroma cacao*) en condiciones de invernadero. El experimento

incluyó sustratos de vermicomposta y *Peat Moss* en concentraciones de 25 y 50 %, combinados con y sin la inoculación del hongo micorrízico. Los resultados mostraron que los tratamientos con 50 % de vermicomposta y 50 % de vermicomposta mezclada con *Peat Moss* generaron los mayores incrementos en la actividad microbiana, el contenido de fósforo foliar y el número de esporas. Además, las plantas inoculadas con micorrizas presentaron una mayor altura y una mejora significativa en su nutrición en comparación con los tratamientos sin inoculación.

Trejo et al. (2011) investigaron el efecto de siete consorcios de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) aislados de fincas cafetaleras con distintos niveles de tecnificación (bajo, medio y alto) sobre el crecimiento de plantas de café (*Coffea arabica* L.) variedad Garnica, tanto en condiciones de invernadero como en campo. En el invernadero, los consorcios inoculados aumentaron la altura de las plantas en un 91 % respecto a los testigos. A los 130 días, el consorcio más efectivo fue La Estanzuela (ES). En el campo, a los 290 días, los consorcios ES, Miradores (MI) y Paso Grande (PG) presentaron una mayor tasa de supervivencia (>80 %), destacándose especialmente los consorcios de nivel medio de tecnificación (MI y ES), que contenían una mayor cantidad de especies de HMA.

Vallejos-Torres, Arévalo, et al. (2019) investigaron la respuesta de clones de café (*Coffea arabica* L., variedad Caturra) a la inoculación con consorcios de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y la aplicación de compost en condiciones de campo. El estudio se diseñó de forma factorial, utilizando tres inóculos de HMA y dos dosis de compost, y se evaluaron parámetros como la altura de las plantas, el número de ramas, el micelio extraradical, la colonización micorrízica y las esporas a los 295 días. Los resultados demostraron que tanto la inoculación con HMA como la aplicación de compost generaron mejoras significativas en el desarrollo morfológico de las plantas.

Del Aguila et al. (2018) investigaron el impacto de nueve consorcios de hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento de plántulas de café (*Coffea arabica* L., var. Caturra) durante un periodo de siete meses en vivero, comparando los tratamientos inoculados con un control sin inoculación. El estudio se llevó a cabo en la Región San Martín, Perú, una zona clave para la producción cafetera. Los resultados indicaron que tres de los consorcios de HMA fueron especialmente efectivos en promover el crecimiento y el desarrollo de las plantas de café. Las plántulas inoculadas aumentaron su altura en un 10,65 %, y el área foliar mostró incrementos significativos, con variaciones entre un 77,45 % y un 239,31 %, en comparación con el control.

Loja y Méndez (2015) evaluaron en Azogues-Cañar el impacto de cuatro enmiendas orgánicas (estiércol, bocashi, compost y biofertilizante) sobre un suelo de manejo convencional, realizando la medición cuatro meses después de su aplicación. La densidad aparente (D_a) inicial del suelo era de $1,33 \text{ g cm}^{-3}$, y tras la aplicación de compost, se redujo a

1,22 g cm⁻³. Los otros tratamientos (estiércol, bocashi y biofertilizante) generaron una disminución de la Da a valores entre 1,05 y 1,09 g cm⁻³. Estos resultados sugieren que el uso de enmiendas orgánicas, junto con las prácticas culturales adecuadas, contribuye a una mejora en la estructura del suelo, reduciendo su densidad aparente.

Nieto (2019) evaluó en Yarinacocha-Ucayali, Perú, el impacto de distintas dosis de biocarbón en la reducción de la compactación de un suelo sobrepastoreado a los 18 meses, utilizando el rendimiento de *Zea mays* variedad "INIA 616" como indicador. Se aplicaron tres dosis de biocarbón enriquecido con Biol de vaca (5, 10 y 15 t ha⁻¹), junto con un tratamiento testigo (T0). El tratamiento con la dosis más alta (T3) resultó en una reducción significativa de la densidad aparente (Da) en 0,19 g cm⁻³ y un incremento de la porosidad total (Pt) en un 48,7 %, lo que representó un aumento del 7,06 % respecto al valor inicial.

Zanor et al. (2018) investigaron el efecto de dos tipos de lombricomposta en un suelo pobre en nutrientes en la Universidad de Guanajuato. Se aplicaron lombricompostas provenientes de efluentes de estiércol bovino (LBE) y de hortalizas y frutas (LBH) a una dosis de 4 t ha⁻¹, generando los suelos tratados SLE y SLH, respectivamente. Los resultados indicaron que no hubo diferencias significativas en la densidad aparente (DA) entre el suelo testigo (1,10 g cm⁻³) y los suelos tratados (SLE: 1,10 g cm⁻³ y SLH: 1,07 g cm⁻³), lo que podría atribuirse al corto periodo de interacción (diez semanas). En cuanto a la porosidad total (Pt), el suelo testigo presentó un valor de 48,92 %, mientras que los tratamientos aumentaron la Pt en un 0,65 % para SLE y un 4,15 % para SLH.

Bravo & Rosillo (2010) evaluaron en la Estación Experimental "La Argelia" (Los Molinos) el impacto de la aplicación de arena silíceo, carbón vegetal y bocashi en distintas dosis sobre las propiedades físicas del suelo, transcurridos siete meses. La densidad aparente (Da) inicial de 1,58 g cm⁻³ disminuyó con los tratamientos, destacando el tratamiento testigo con 8 % de bocashi, que redujo la Da a 1,29 g cm⁻³. La porosidad total (Pt) aumentó del 45,25 % en el suelo testigo al 58 % con este mismo tratamiento. Además, la capacidad de aireación (CA) mejoró en promedio del 9 % en el testigo al 12,25 %, siendo los tratamientos con 20 y 25 % de arena en su composición los que lograron los mayores incrementos, alcanzando valores de 10 a 12 % y de 10 a 15 %, respectivamente. El volumen físicamente inerte (VFI) disminuyó, mientras que la disponibilidad de agua aprovechable (AA) aumentó, alcanzando valores de 28 a 31 %θ_v con 8 % de bocashi (testigo). También se observaron incrementos significativos en la humedad a saturación, la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), con valores de CC entre 42 y 47 %θ_v, y de PMP entre 16 y 18 %θ_v.

En la hoya de Loja, sector Masaca, Villamagua et al. (2008) reportaron a los nueve meses mejoras en las propiedades físicas del suelo tras aplicar diferentes tratamientos: S0 (6 % de bocashi), S1 (6 % de bocashi + 10 t ha⁻¹ de carbón vegetal), S2 (6 % de bocashi +

15 t ha⁻¹ de carbón vegetal) y S3 (6 % de bocashi + 20 t ha⁻¹ de carbón vegetal). La densidad aparente (Da) inicial de 1,33 g cm⁻³ disminuyó notablemente con el tratamiento S2, alcanzando 0,98 g cm⁻³, el resultado más efectivo. En cuanto a la porosidad total (Pt), se observaron incrementos significativos: S0 alcanzó un 41 %, S1 un 44 %, S2 un 54 % y S3 un 55 %. Asimismo, la capacidad de aireación (CA) mejoró, pasando del 10 %θv inicial a 16 %θv en S0 y S1, y a valores más altos de 35 y %θv en S2 y S3, respectivamente. El aumento en la CA de los tratamientos S2 y S3 se atribuyó a la adición de carbón vegetal en dosis de 1,5 y 2 kg m⁻², lo que favoreció el mejoramiento de las características físicas del suelo, clasificándolo de pobre a medio.

Villamagua et al. (2013) aplicaron 2 kg m⁻² (20 t ha⁻¹) de biocarbón en dos tamaños de partículas (≤ 2 mm y $\geq 2,1 \leq 4,5$ mm) y observaron mejoras en la porosidad total (Pt) del suelo, que aumentó del 40 al 55 %, sin importar el tamaño de partícula. Las condiciones físicas del suelo mejoraron significativamente, pasando de pobres a medios y buenos, principalmente por el aumento de la capacidad de aireación, que pasó de baja a media y alta. En contraste, el suelo testigo, sin biocarbón, permaneció en condiciones físicas "pobres".

Gubelin (2017) realizó un análisis de las propiedades físicas del suelo en un parrón de uva de mesa en Vicuña, Región de Coquimbo, Chile, tras la aplicación de 5,7 t ha⁻¹ de compost y el cultivo de haba como cobertura. El estudio se desarrolló en dos etapas de seis meses cada uno, y los tratamientos evaluados incluyeron un testigo (T0), suelo con compost (T1) y suelo con compost más cultivo de cobertura (T2). En la primera medición, la densidad aparente (Da) mostró una disminución significativa con la aplicación de compost y su combinación con el cultivo de cobertura, alcanzando los siguientes valores: T0: 1,17 g cm⁻³, T1: 0,93 g cm⁻³ y T2: 0,84 g cm⁻³. Sin embargo, en la segunda medición no se observaron diferencias significativas, aunque tanto T1 como T2 mantuvieron valores de Da inferiores al testigo (T0: 1,25 g cm⁻³, T1: 1,14 g cm⁻³, T2: 1,17 g cm⁻³). El aumento en la Da durante esta medición se atribuyó al pisoteo generado durante las labores de manejo de los cultivos.

Moya y Farinango (2010) estudiaron los cambios físico-químicos en un suelo agrícola tras la siembra de abonos verdes (Vicia sativa y Avena sativa) y la aplicación de abonos orgánicos y fertilizantes minerales a los seis meses. Los tratamientos evaluados incluyeron compost (T1, 10,52 t ha⁻¹), humus de lombriz (T2, 47,05 t ha⁻¹), champiñonaza (T3, 12,69 t ha⁻¹) y un fertilizante mineral tradicional (T0), compuesto por 266,7 kg ha⁻¹ de 10-30-10, 50,7 kg ha⁻¹ de urea y 22,22 kg ha⁻¹ de muriato de potasio. La densidad aparente (Da) inicial con el abono verde fue de 0,69 g cm⁻³. Posteriormente, la Da aumentó con T0 (0,74 g cm⁻³), T1 (0,72 g cm⁻³) y T2 (0,72 g cm⁻³), mientras que el tratamiento T3 logró reducirla a 0,67 g cm⁻³, destacándose como el más efectivo para mejorar esta propiedad del suelo.

Prado (2004) investigó el efecto de la aplicación de abono bocashi en el cultivo de pimiento híbrido Quetzal en el cantón Puyango, provincia de Loja. Los tratamientos consistieron en diferentes dosis de bocashi: T1 (0,5 kg planta⁻¹), T2 (1 kg planta⁻¹), T3 (1,5 kg planta⁻¹) y un tratamiento testigo (T4). En el testigo, la capacidad de aireación (CA) fue del 15 %θv, la disponibilidad de agua aprovechable (AA) fue del 20 %θv y el volumen físicamente inerte (VFI) fue del 65 %θv, lo que indicó un suelo con características físicas entre medio y bueno. En los tratamientos T1 y T2, la CA aumentó a 21 %θv, el AA se incrementó a 20 %θv en T1 y 21 %θv en T2, mientras que el VFI disminuyó a 58 %θv en T1 y 59 %θv en T2, clasificándose como "bueno". El tratamiento T3 mostró los mejores resultados, con un aumento notable en la CA (28 %θv), el AA (20 %θv) y el VFI (50 %θv), lo que situó los suelos en la categoría de "bueno" a "muy bueno". Este efecto positivo fue atribuido al uso de materiales como pulpa de café, bagacillo de caña, gallinaza y carbón vegetal, los cuales favorecen la aireación, retienen agua y nutrientes, y corrigen la acidez del suelo. En cuanto a los contenidos de humedad, el testigo presentó 65 %θv a saturación, 50 %θv a capacidad de campo (CC) y 30 %θv a punto de marchitez permanente (PMP). Los tratamientos T1, T2 y T3 presentaron los siguientes valores: saturación (56, 50 y 59 %θv), CC (35, 29 y 31 %θv) y PMP (14, 9 y 9 %θv), respectivamente.

Uscumayta (2018) evaluó el efecto de compost en el cultivo de *Coffea arabica L.* en el lapso de tiempo de ocho meses, utilizando dosis de 0, 400, 800 y 1 200 g de compost por planta. Los resultados mostraron que a medida que aumentaba la dosis de compost, también lo hacía la altura de las plantas. Las dosis de 1 200 y 800 g alcanzaron alturas de 99,63 y 98,24 cm, respectivamente, con diferencias significativas frente a las dosis de 0 y 400 g, que presentaron alturas de 91,99 y 93,81 cm. En cuanto al diámetro, la dosis de 1 200 g de compost produjo un diámetro promedio de 21,01 mm, significativamente mayor que las dosis de 0 y 400 g, que presentaron 17,89 y 19,44 mm, respectivamente. El número de ramas fue similar en los tratamientos de 400, 800 y 1 200 g (5 ramas), pero mostró una diferencia significativa respecto al tratamiento con 0 g de compost, que tuvo 4,32 ramas. Además, la dosis de 1 200 g resultó en un promedio de 5,03 hojas por planta, significativamente mayor que las dosis de 0 y 400 g, que presentaron 4,71 y 4,97 hojas, respectivamente.

Canseco et al. (2020) evaluaron el efecto de diversos abonos orgánicos y biofertilizantes sobre el crecimiento del café arábica (*Coffea arabica L.*) en campo, durante un período de 360 días, utilizando plantas cultivadas en un terreno renovado tres años antes. Los abonos orgánicos empleados fueron lombricomposta (L), Natur-abono (Na), Bio-Orgamin (Bo) y guano de murciélago (Gm), mientras que los biofertilizantes fueron *Azotobacter sp.* (Az) y *Glomus cubense* (Gc), así como sus combinaciones, además de un tratamiento testigo (T). Los resultados revelaron que los cafetos respondieron positivamente a los abonos y biofertilizantes, alcanzando alturas significativamente mayores que el testigo. La combinación

de Gm+L+Gc resultó en una altura excepcional de 216 cm, lo que sugiere una interacción favorable entre estos componentes para el crecimiento. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en el diámetro del tallo entre los tratamientos, lo que se atribuyó a la posible formación de la estructura reproductiva en el año anterior. Asimismo, la combinación de Gm+L+Gc presentó el mayor número de nudos, con un promedio de 56,33.

Vargas (2020) evaluó la respuesta agronómica de tres variedades de café (13-20-14, Sarchimor y Geisha) bajo fertilización foliar con Biol al 20, 30 y 40 %. En cuanto al crecimiento en altura, la dosis de 30 % destacó con un incremento de 16,58 cm en la primera semana y 27,87 cm en la semana 16, mientras que la dosis más baja, 20 %, mostró el menor crecimiento con 14,71 cm y 24,19 cm, respectivamente, registrándose diferencias significativas entre las dosis. Respecto al número de hojas, durante las primeras cuatro semanas no hubo cambios significativos, pero al final de la semana 16, la dosis de 30 % mantuvo el promedio más alto con 9,90 hojas, frente a 9,24 hojas de la dosis de 20 %. Esto demuestra que el nivel de fertilización influye positivamente en el desarrollo vegetativo del café.

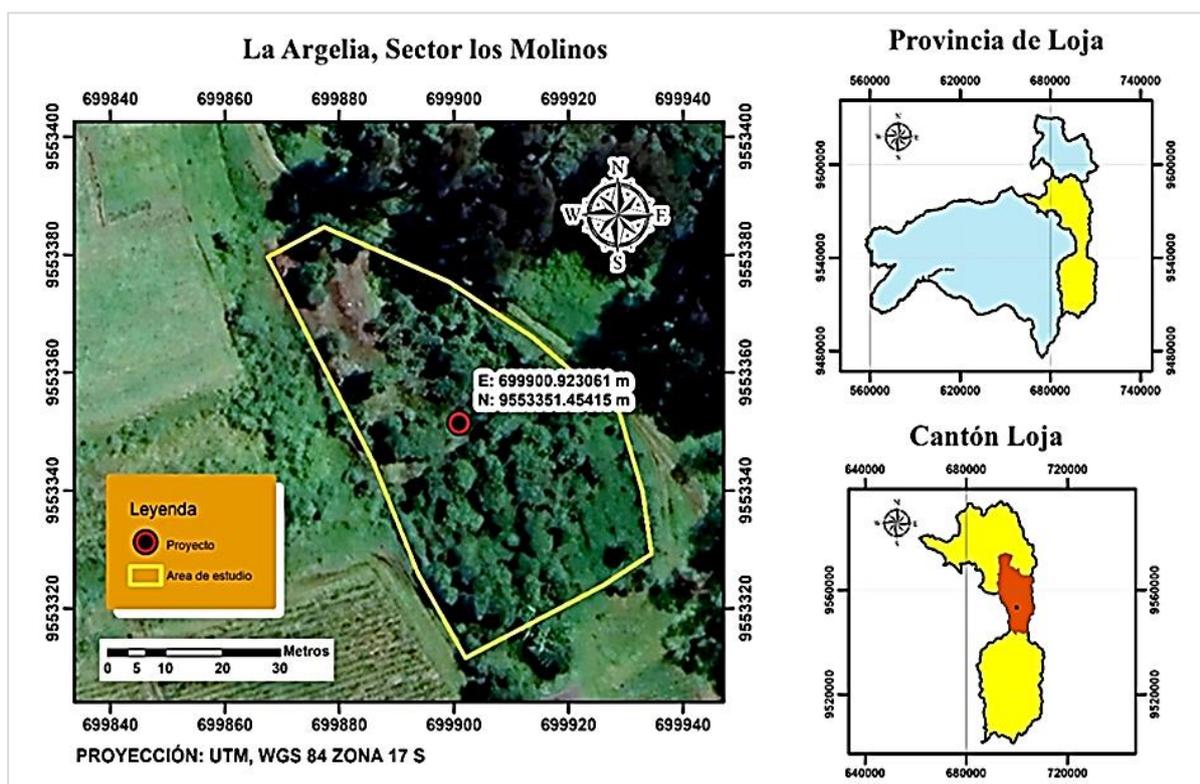
Cosme et al. (2020) estudiaron el efecto del abono orgánico acelerado en el crecimiento y desarrollo de plantas de café (*Coffea arabica* L., variedad Catimor) durante 75 días, distribuidas en cinco aplicaciones. Se emplearon dos tratamientos: tratamiento 1 (sin abono orgánico acelerado) y tratamiento 2 (con abono orgánico acelerado, 20 ml por litro de agua). En cuanto al diámetro de tallo, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, obteniéndose un diámetro de 5,74 mm para el tratamiento con abono orgánico acelerado y de 5,41 mm para el tratamiento sin abono. Sin embargo, en relación con el número de ramas por planta, el tratamiento con abono orgánico acelerado presentó un promedio de 3,25 ramas por planta, significativamente mayor que el tratamiento sin abono, que mostró un promedio de 1,5 ramas por planta.

Núñez (2022) evaluó el efecto de diferentes tratamientos de fertilización en *Coffea arabica*, aplicando fertilización química (NPK/10-30-10), orgánica (Champiñonaza), mixta (NPK + Champiñonaza) y un testigo. Las dosis anuales por planta fueron 501 g de NPK, 6 kg de Champiñonaza, y 252 g de NPK + 3 kg de Champiñonaza, distribuidas en tres aplicaciones. No se observaron diferencias significativas en el número de ramas entre los tratamientos orgánico y mixto en ningún periodo. Sin embargo, el tratamiento químico mostró diferencias significativas en el número de ramas plagiotrópicas a partir de los 270 días (53,89 ramas). En cuanto al número de nudos, no hubo diferencias significativas a los 90 días, pero a los 180 días, el tratamiento químico presentó los mejores resultados, seguido por los tratamientos orgánico y mixto, con diferencias altamente significativas ($p = 0,005$) a los 270 días.

5. Metodología

5.1. Descripción del área de estudio

La investigación se desarrolló en la Estación Experimental La Argelia de la Universidad Nacional de Loja, parroquia Punzara, cantón y provincia Loja, a una altitud de 2130 msnm. Coordenadas Planas UTM zona 17S aproximadamente; Norte: 9 553 351 m y Este: 699 901 m. En la Figura 7, se muestra la ubicación del proyecto de investigación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Ubicación geográfica del proyecto de investigación, Estación Experimental La Argelia.

- **Clima.** En base a información climática recopilada por la estación meteorológica “La Argelia” durante un periodo de 25 años (1990-2015), las condiciones climáticas son las siguientes: temperatura media anual de 16,1 °C, con una precipitación aproximada de 1 089,3 mm año⁻¹ y una humedad relativa ambiental del 74 % (González, 2019).
- **Zona de vida.** Según el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge (1967) la Estación Experimental La Argelia corresponde a (bs-mb), bosque seco montano bajo.
- **Geología.** Corresponde a Depósitos Aluviales (Q_A), los mismos que están constituidos por material poco consolidado con cantos y bloques de rocas metamórficas y volcánicas (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2021).

- **Suelo.** Propiedades físicas: Suelos de textura media, media-fina a gruesa en profundidad, con estructura en bloques subangulares en los horizontes superficiales y sin estructura en profundidad, presentando condiciones físicas desfavorables para los cultivos debido a la baja capacidad de aireación y agua aprovechable.
Propiedades químicas: pH de 5,10 y 2,21 % de materia orgánica (Obaco, 2023).

5.2. Materiales

- **Materiales de laboratorio:** Bandejas plásticas, capsulas de porcelana, malla filtrante, ligas elásticas, equipo para muestreo de suelos y cilindros Kopecky de 100 cm³.
- **Equipos:** Balanza digital de precisión, estufa y centrifuga.
- **Sustancias:** Agua destilada.
- **Insumos:** Hongos micorrízicos arbusculares (encapsulados), abono orgánico (Nutrisano), plantas de café (Geisha Panamá), muestras de suelo alteradas e inalteradas, fertilizantes (Cal dolomítica, Sulpomag, Kieserita, Sulfato de Zinc, Bórax, Nitrato de amonio, Nutri-leaf, Grow Combi 1, Bonanza, YaraMilla HYDRAN, Biol y Fosfato Diamónico DAP) e insecticida agrícola (Crispirofos).
- **Materiales de campo:** GPS, herramientas agrícolas, bomba fumigadora manual, cinta masking blanca, manguera, flexómetro, cámara fotográfica o celular, calibrador pie de rey digital, fundas ziploc, libreta de apuntes, etiquetas, estacas de madera y sacos de polipropileno.
- **Materiales de oficina:** Ordenador portátil, software para análisis estadístico InfoStat, material bibliográfico, hoja de cálculo, calculadora e impresora.

5.3. Diseño de la investigación

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con arreglo bifactorial, incluyendo tres réplicas y 16 tratamientos. Los factores evaluados fueron el abono orgánico y los hongos micorrízicos (ver Tabla 6).

Tabla 6. Factores de estudio.

Abono orgánico (AO)	
AO1	0 %
AO2	6 %
AO3	8 %
AO4	10 %
Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)	
HMA1	0 encapsulados
HMA2	10 encapsulados
HMA3	20 encapsulados
HMA4	30 encapsulados

Implementación de consorcios de HMA y especies: Género (Glomus, Acaulospora y Scutellospora). [10 encapsulados (100 esporas), 20 encapsulados (300 esporas), 30 encapsulados (500 esporas)]

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7 detalla los tratamientos del experimento, conformados por combinaciones de abono orgánico (AO) y hongos micorrícicos arbusculares (HMA). Estos tratamientos se diseñaron para analizar su influencia en las propiedades físicas e hidrofísicas del suelo, así como en el crecimiento del cultivo de café.

Tabla 7. Tratamientos.

N° Tratamiento	Factores	
	AO	HMA
T1	AO1 (0 %)	HMA1 (0 encapsulados)
T2	AO1 (0 %)	HMA2 (10 encapsulados)
T3	AO1 (0 %)	HMA3 (20 encapsulados)
T4	AO1 (0 %)	HMA4 (30 encapsulados)
T5	AO2 (6 %)	HMA1 (0 encapsulados)
T6	AO2 (6 %)	HMA2 (10 encapsulados)
T7	AO2 (6 %)	HMA3 (20 encapsulados)
T8	AO2 (6 %)	HMA4 (30 encapsulados)
T9	AO3 (8 %)	HMA1 (0 encapsulados)
T10	AO3 (8 %)	HMA2 (10 encapsulados)
T11	AO3 (8 %)	HMA3 (20 encapsulados)
T12	AO3 (8 %)	HMA4 (30 encapsulados)
T13	AO4 (10 %)	HMA1 (0 encapsulados)
T14	AO4 (10 %)	HMA2 (10 encapsulados)
T15	AO4 (10 %)	HMA3 (20 encapsulados)
T16	AO4 (10 %)	HMA4 (30 encapsulados)

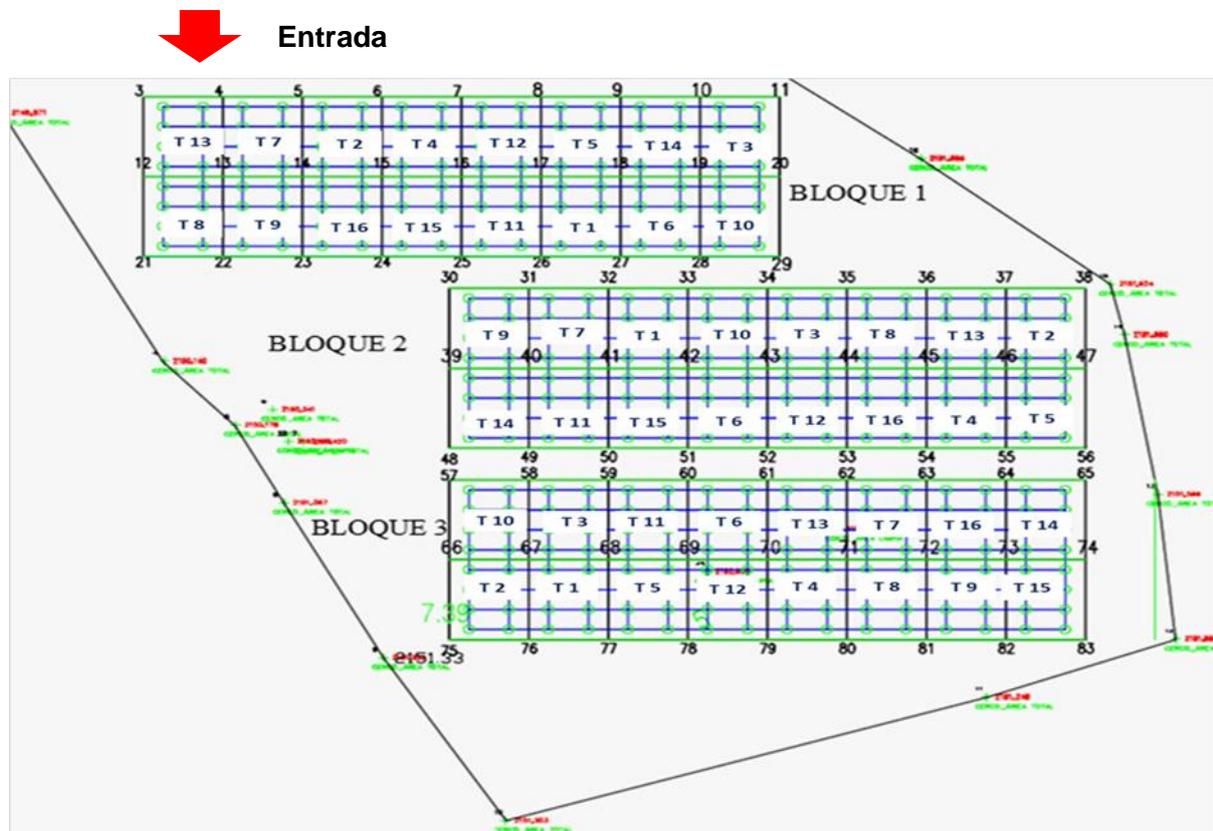
Fuente: Elaboración propia.

5.3.1. Distribución de las parcelas

Características técnicas

- Longitud: 5 m
- Ancho: 4 m
- Área UE : 20 m²
- Área total neta: 960 m²
- Tratamientos: 16
- Repeticiones: 3
- Plantas por unidad: 8
- Unidades experimentales: 48
- Número plantas experimento: 384
- Distancia entre plantas: 1,25 m
- Distancia entre hileras: 2 m
- Distancia entre bloques: 1 m

La Figura 8 ilustra la ubicación y distribución de las parcelas de muestreo en el área de estudio, resaltando el diseño espacial implementado para asegurar la representatividad y la confiabilidad en la recolección de datos.



Fuente: Obaco (2023).

Figura 8. Diseño experimental para la investigación del efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y hongos micorrízicos sobre la macro porosidad del suelo y el desarrollo vegetativo del café (*Coffea arabica* L.).

Modelo estadístico aplicado en el experimento:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha \beta)_{ij} + \gamma_k + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

y_{ijk} : Observación en la unidad experimental sujeta al i-ésimo nivel del factor enmienda orgánica, j-ésimo nivel del factor hongo micorrízico y k-ésima replica.

μ : Efecto de la media general.

α_i : Efecto del i-ésimo nivel de enmienda orgánica ($i = 1, 2, 3, 4$).

β_j : Efecto del j-ésimo nivel de hongo micorrízicos ($j = 1, 2, 3, 4$).

$(\alpha \beta)_{ij}$: Efecto de la combinación del factor enmienda orgánica y hongo micorrízicos.

γ_k : Efecto del i-ésimo bloque ($k = 1, 2, 3$).

ε_{ij} : Efecto del error experimental (variable independiente normalmente distribuida con media igual a cero y varianzas homogéneas).

5.4. Metodología por objetivos

En la Estación Experimental “La Argelia”, Obaco (2023) evaluó el efecto de las enmiendas orgánicas y los hongos micorrízicos en la macroporosidad del suelo y el crecimiento del cafeto durante los primeros 90 días del cultivo. A los 180 días post-trasplante, se procedió a determinar las propiedades físicas e hidrofísicas del suelo. Además, las variables de crecimiento del cafeto fueron monitoreadas y analizadas en los intervalos de 120, 150, 180 y 210 días, lo que permitió realizar una evaluación continua del efecto de los tratamientos sobre el desarrollo del cultivo.

5.4.1. Metodología para el primer objetivo

Evaluar el efecto de las enmiendas orgánicas y consorcios de HMA nativos sobre las condiciones físicas del suelo para el mejoramiento de la capacidad de aireación y enraizamiento del cafeto.

Se recolectaron 96 muestras de suelo, clasificadas en dos grupos según su estado y finalidad de análisis. El primer grupo, integrado por 48 muestras de suelo no disturbadas (una muestra por unidad experimental), se destinó a la determinación de parámetros físicos como la densidad aparente y saturación. Dichos análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Suelos, Agua y Bromatología de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja, utilizando técnicas estandarizadas aceptadas en el ámbito de la ciencia del suelo. El segundo grupo, compuesto por 48 muestras de suelo disturbadas (una muestra por unidad experimental), se empleó para caracterizar los parámetros de determinación de agua en el suelo. Este procedimiento fue desarrollado en el Laboratorio de Suelos, Foliar y Aguas de Agrocalidad, ubicado en Tumbaco-Pichincha. Estos análisis y resultados obtenidos permitieron la construcción de la curva de retención de humedad y la evaluación de las condiciones físicas del suelo.

▪ *Determinación de la densidad aparente del suelo (Método del cilindro metálico)*

Para la determinación de la densidad aparente, se siguió el procedimiento basado en los trabajos de "Brye et al. (2004), Grossman et al. (2002) y Page-Dumroese et al. (1999), citados por Aguilar (2014):

1. Preparación de las muestras: Se recolectaron muestras de suelo no disturbadas utilizando cilindros Kopecky de volumen conocido (100 cm³), asegurando que las muestras se mantuvieran intactas para preservar su estructura natural.
2. Secado de las muestras: Las muestras fueron sometidas a un proceso de secado en un horno a una temperatura constante de 105 °C durante 24 horas, con el objetivo de eliminar toda la humedad presente.

3. Medición del volumen del suelo: El volumen de cada muestra se definió a partir del volumen del cilindro utilizado para la recolección, dado que se trataba de muestras inalteradas.
4. Determinación de la masa del suelo seco: Posteriormente, las muestras secas fueron pesadas en una balanza analítica de precisión para obtener la masa del suelo seco.
5. Cálculo de la densidad aparente: La densidad aparente (D_a) se calculó dividiendo la masa del suelo seco (M_s) por su volumen total (V_t), utilizando la fórmula:

$$D_a = \frac{M_s}{V_t}$$

Donde M_s es la masa de sólidos (g) y V_t es el volumen total del suelo (cm^3), el cual incluye el volumen de sólidos (V_s), el volumen de aire (V_a) y el volumen de agua (V_w) presentes en el suelo.

▪ ***Determinación de la saturación del suelo (Método del cilindro metálico)***

Para la determinación de la saturación del suelo, se siguió el procedimiento descrito en el manual de Quiroga y Bono (2012), que detalla las etapas necesarias para realizar la medición de manera precisa y controlada:

1. Preparación de las muestras: Se recolectaron muestras de suelo no disturbadas utilizando cilindros Kopecky de volumen conocido (100 cm^3), asegurando que las muestras conservaran su estructura original para una evaluación precisa
2. Saturación de las muestras: Las muestras se sumergieron en agua destilada durante 24 horas para garantizar la saturación completa de los poros. Este procedimiento se realizó bajo condiciones controladas para evitar la pérdida de material o la alteración de la muestra.
3. Pesado de las muestras: Se registró el peso de las muestras saturadas utilizando una balanza analítica de precisión. Posteriormente, las muestras se secaron en un horno a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas para eliminar la humedad, y se determinó su peso seco.
4. Medición del volumen de las muestras: El volumen de las muestras se determinó directamente a partir del volumen del cilindro utilizado en la recolección (100 cm^3), dado que se trataba de muestras no disturbadas.
5. Cálculo del porcentaje de saturación: El porcentaje de saturación (% Saturación) se calculó con la fórmula:

$$\% \text{ Saturación} = \frac{P_{nms} (g) - P_{ns} (g)}{P_{ns} (g)} \times 100 \quad \text{Saturación} = \text{Porosidad, (Rucks et al., 2004).}$$

Donde P_{nms} es el peso neto de la muestra saturada (g), correspondiente al estado totalmente saturado con agua, y P_{ns} es el peso neto seco (g), obtenido tras secar la muestra en un horno a temperatura constante para eliminar su humedad.

▪ **Determinación de características hidrofísicas del suelo**

El procedimiento para determinar la humedad equivalente, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y el agua aprovechable en suelos agrícolas se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por López (2016), adoptada por AGROCALIDAD. Esta metodología utiliza el método de la centrífuga como técnica principal para las determinaciones, y se desarrolla de la siguiente manera:

1. Recubrir la malla de las cajas de la centrífuga con papel filtro.
2. Pesarse 25 g de muestra de suelo y colocarla en las cajas de la centrífuga con la muestra por 24 horas, procurando que el agua llegue hasta la mitad de la caja.
3. Drenar las cajas de la centrífuga por 15 minutos sobre un paño (vileda o franela).
4. Colocar las cajas en la centrífuga por 15 minutos a una velocidad de 2500 rpm (1 000 veces la gravedad) durante media hora.
5. Pesarse una cápsula de aluminio vacía en la balanza de precisión. Anotar el peso.
6. Trasvasar la muestra contenida en la caja de la centrífuga a la cápsula de aluminio.
7. Tapar la cápsula y pesarla en la balanza de precisión. Anotar el peso.
8. Secar la muestra contenida en la cápsula de aluminio en la estufa de aire forzado a los 105 °C por 24 horas.
9. Enfriar la muestra en un desecador por 1 hora.
10. Pesarse la muestra seca contenida en las cápsulas de aluminio en balanza de precisión. Anotar peso.
11. Después de lo cual se realizan las siguientes fórmulas:

Humedad equivalente

$$\% HE = \frac{P_{H+C} - P_{S+C}}{P_{S+C} - P_C} \times 100$$

En donde HE representa la humedad equivalente, P_{H+C} es el peso en gramos de la muestra húmeda junto con la cápsula de aluminio, P_{S+C} corresponde al peso en gramos de la muestra seca más la cápsula de aluminio, y P_C es el peso en gramos de la cápsula de aluminio vacía.

Capacidad de campo

Para suelos arenosos:

$$CC(\%) = HE \times 0,774 \times 4,41$$

Para suelos francos y arcillosos:

$$CC(\%) = HE \times 0,865 \times 2,62$$

En donde **CC** es la capacidad de campo y HE es la humedad equivalente.

Punto de marchitez

$$PM(\%) = \frac{HE}{1,84}$$

En donde PM es el punto de marchitez y HE es la humedad equivalente,

Agua aprovechable

$$AA(\%) = CC - PMP$$

En donde AA es el agua aprovechable, **CC** es la capacidad de campo, y el PM es el punto de marchitez.

▪ **Construcción de la curva de retención de humedad**

A partir de los valores obtenidos de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, se elaboró en una hoja de cálculo la curva de retención de humedad del suelo. En esta gráfica, se representó la relación entre el potencial hídrico (eje Y) y el contenido volumétrico de humedad (eje X) (Vélez, 2021), proporcionando una visión detallada sobre la capacidad del suelo para retener agua bajo diferentes niveles de tensión hídrica.

▪ **Evaluación de las condiciones físicas del suelo**

Según ILACO (1981), citado por C. Valarezo et al. (1998), el análisis de las condiciones físicas del suelo requiere la determinación de tres parámetros fundamentales: agua aprovechable (AA), capacidad de aireación (CA) y volumen físicamente inerte (VFI). Para este estudio, se aplicaron los siguientes procedimientos:

1. Agua aprovechable: Procedimiento descrito anteriormente.

$$AA (\% \theta_v) = CC (\% \theta_v) - PMP (\% \theta_v).$$

2. Capacidad de aireación: La CA se calculó como la diferencia entre el contenido de humedad en la saturación ($\% \theta_v$) y la capacidad de campo ($\% \theta_v$). Este parámetro refleja la cantidad de poros disponibles para el intercambio gaseoso en el suelo.

$$CA (\% \theta_v) = \text{Satur.} (\% \theta_v) - CC (\% \theta_v).$$

3. Volumen físicamente inerte: Se estimó considerando la proporción de poros que no contribuyen significativamente al almacenamiento de agua aprovechable ni a la capacidad de aireación. El cálculo se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$VFI (\% \theta_v) = 100 - [AA (\% \theta_v) + CA (\% \theta_v)].$$

Finalmente, los datos obtenidos fueron analizados utilizando un diagrama triangular para la evaluación de las condiciones físicas del suelo (ver Anexo 1).

5.4.2. Metodología para el segundo objetivo

Monitorear el desarrollo vegetativo del cultivo de café frente a la aplicación de diferentes dosis de enmiendas orgánicas y consorcios de HMA nativos en el período de 90-210 días después de la siembra del cafeto.

Las evaluaciones para determinar el crecimiento del cultivo de café se realizaron en intervalos específicos de tiempo: a los 120, 150, 180 y 210 DDT. En cada uno de estos puntos temporales, se llevaron a cabo mediciones detalladas de diversos parámetros de crecimiento, proporcionando información clave sobre la respuesta del café a las prácticas agronómicas implementadas. La medición de estas variables se realizó siguiendo la metodología empleada por Cubillo y Gutiérrez (2011), que incluye la evaluación de parámetros como la altura de la planta, el diámetro del tallo, el número de ramas, el número de nudos y el total de hojas. Además, se emplearon técnicas estandarizadas de medición para asegurar la consistencia y fiabilidad de los datos obtenidos:

Altura de la planta (cm): Se midió con un flexómetro desde el cuello hasta el ápice de la planta, lo que indica el crecimiento vertical y la salud general de la planta.

Diámetro del tallo (mm): Se midió con un calibrador pie de rey digital a cinco centímetros del suelo, proporcionando información sobre el grosor del tallo, que refleja el vigor y la capacidad de la planta para almacenar nutrientes.

Número de ramas: Se contó el número de ramas plagiotrópicas primarias, las cuales son clave para la fotosíntesis y el desarrollo estructural de la planta.

Número de nudos: Se contó el número de nudos por planta, ya que estos son los puntos de crecimiento de nuevas ramas y hojas.

Número de hojas: Se contabilizó el número total de hojas, un parámetro crucial para evaluar la capacidad fotosintética y el crecimiento vegetativo de la planta.

5.4.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados de las propiedades físicas e hidrofísicas del suelo, así como las variables de crecimiento de las plantas, se realizó mediante un análisis de varianza (ANAVA) y la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de ($p \leq 0,05$). Para este propósito, se utilizó el software InfoStat/Estudiantil versión 2020e, siguiendo las indicaciones proporcionadas en la guía de uso de InfoStat publicada por Urrutia et al. (2020). Los gráficos fueron generados utilizando una herramienta de hoja electrónica.

6. Resultados

Según lo descrito en la metodología, esta investigación da continuidad al estudio realizado por Obaco (2023). A continuación, se detallan los resultados obtenidos entre los 90 y 210 días del período de estudio.

6.1. Evaluación de las propiedades físicas, características físicas e hidrofísicas del suelo

El análisis de varianza de densidad aparente, porosidad y otras propiedades físicas del suelo (Anexos 3, 4 y 5) mostró que no hubo interacción significativa entre el abono orgánico (AO) y los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Sin embargo, mientras el HMA no presentó efectos estadísticamente significativos, el AO sí mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$), evidenciando su impacto en estas propiedades.

6.1.1. Densidad aparente

La Tabla 8 muestra que las dosis de 10 y 8 % de abono orgánico arrojaron los mejores resultados en la reducción de la densidad aparente. En particular, estos tratamientos lograron una disminución de 0,19 y 0,13 g cm^{-3} , respectivamente, en comparación con el suelo control.

Tabla 8. Promedios y prueba Tukey al 5 % para valores de densidad aparente (g cm^{-3}).

Tratamiento	Da (g cm^{-3})		Dif vs Test.o
	0 días*	180 días	
10 % de AO	1,28 A	1,00 A	0,19
8 % de AO	1,24 A	1,06 AB	0,13
6 % de AO	1,28 A	1,12 BC	0,07
Testigo	1,25 A	1,19 C	0,00

Medias con una letra común en la misma columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Enlistado en forma ascendente.

Fuente: Elaboración propia; *Tomado de Obaco (2023).

6.1.2. Porosidad total

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 9, las dosis de 10 y 8 % de abono orgánico generaron los incrementos más significativos en la porosidad del suelo, alcanzando un aumento del 16,72 y 14,02 %, respectivamente, en comparación con el suelo control.

Tabla 9. Promedios y prueba de Tukey al 5 % para porosidad total (%).

Tratamiento	Porosidad total (%)		Dif vs Test.o
	0 días*	180 días	
10 % de AO	41,00 A	62,03 A	16,72
8 % de AO	42,76 A	59,33 A	14,02
6 % de AO	40,94 A	51,32 B	6,01
Testigo	41,20 A	45,31 C	0,00

Medias con una letra común en la misma columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Fuente: Elaboración propia; *Tomado de Obaco (2023).

6.1.3. Características físicas e hidrofísicas del suelo

6.1.3.1. Características físicas e hidrofísicas del suelo antes del ensayo.

Tabla 10. Características físicas e hidrofísicas del suelo, zona del diagrama triangular e interpretación de los suelos del sistema agroforestal de la Quinta Experimental La Argelia antes del ensayo.

Perfiles	Horizonte	Prof.	Textura	Da	Saturación	CC	PMP	AA	CA	VFI	Equivalencia			
		cm		g/cm ³	pF 0,00	pF 2,52	pF 4,20	pF 2,00	pF 2,52			AA	CA	Zona
1	M1 Ap	10	F	1,20	41,76	27,42	11,14	16,28	14,34	69,38	Alto	Medio	III	Medio
	M1 A1	25	F	1,49	26,66	19,75	6,99	12,76	6,91	80,33	Medio	Bajo	I	Muy Pobre
2	M2 Ap	10	F	1,11	36,30	25,80	12,09	13,71	10,00	75,79	Medio	Bajo	I	Muy Pobre
	M2 Ac	25	F	1,32	31,42	20,05	5,24	14,81	11,37	73,82	Medio	Medio	II	Pobre
3	M3 Ap	25	FL	1,24	41,20	31,95	9,76	22,19	9,25	68,56	Muy alto	Bajo	II	Pobre

Fuente: Adaptado de Obaco (2023).

La Tabla 10 muestra los resultados de las propiedades físicas del suelo para los tres perfiles analizados. Los horizontes superficiales presentan texturas que varían entre franco y franco limoso, con una densidad aparente que oscila entre 1,11 y 1,49 g cm⁻³. De acuerdo con el diagrama triangular de características físicas del suelo, estos se clasifican como suelos de clase muy pobre a media.

6.1.3.2. Características físicas e hidrofísicas del suelo a los 180 días del ensayo.

Tabla 11. Características físicas e hidrofísicas del suelo, zona del diagrama triangular e interpretación de los suelos del sistema agroforestal de la Quinta Experimental La Argelia a los 180 días del ensayo.

Sustrato	Da	Saturación	CC	PMP	AA	CA	VFI*	Equivalencia			
	g/cm ³	pF 0,00	pF 2,52	pF 4,20	pF 2,00	pF 2,52		AA	CA	Zona	Clase
10 % de AO	1,00	62,03 A	27,04 A	14,70 A	12,34 A	35,00 A	52,66 A	Medio	Muy alto	III	Medio
8 % de AO	1,06	59,33 A	24,37 A	13,24 A	11,12 A	34,97 A	53,91 B	Medio	Muy alto	III	Medio
6 % de AO	1,12	51,32 B	24,32 A	13,22 A	11,10 A	27,01 B	61,90 C	Medio	Muy alto	III	Medio
Testigo	1,19	45,31 C	24,63 A	13,39 A	11,24 A	20,67 C	68,08 C	Medio	Muy alto	III	Medio

*Medias con una letra común en la misma columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). *Enlistado en forma ascendente.*

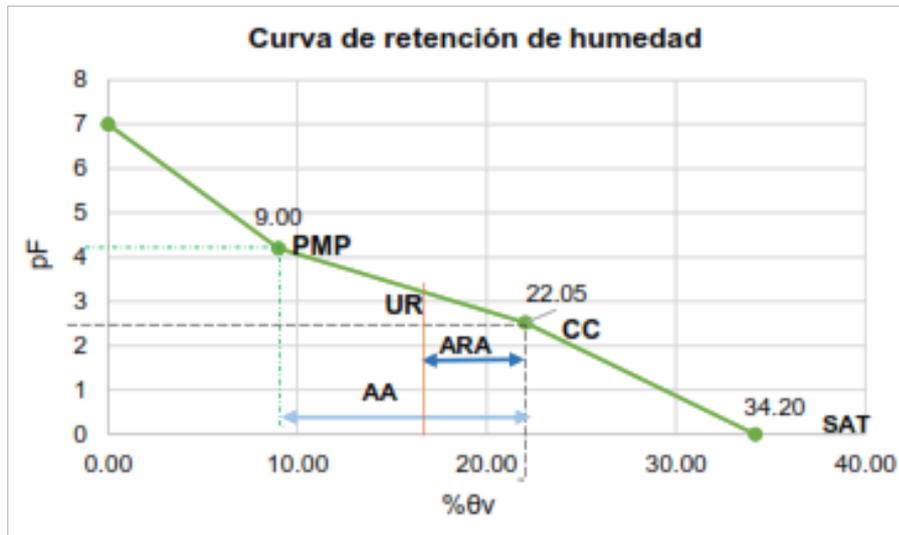
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11, que describe las características físicas del suelo, se observa que los mejores resultados en el parámetro de capacidad de aireación se obtuvieron con la aplicación del 10 y 8 % de abono orgánico, los cuales incrementaron 14,33 y 14,30 % θ_v , respectivamente, en comparación con el suelo control. En cuanto a la fracción de volumen físicamente inerte, el tratamiento con 10 % de abono orgánico mostró la mayor reducción, alcanzando una disminución de 15,42 % θ_v . Respecto al contenido de agua aprovechable, aunque no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos con y sin abono orgánico, el tratamiento con 10 % de abono orgánico presentó un incremento leve de 1,10 % θ_v en comparación con el control. En términos generales, la condición física del suelo mejoró de la clases (muy pobre y pobre) a clase media en todos los tratamientos, incluyendo el control, en comparación con los valores iniciales antes del ensayo.

6.1.4. Curvas de retención de humedad

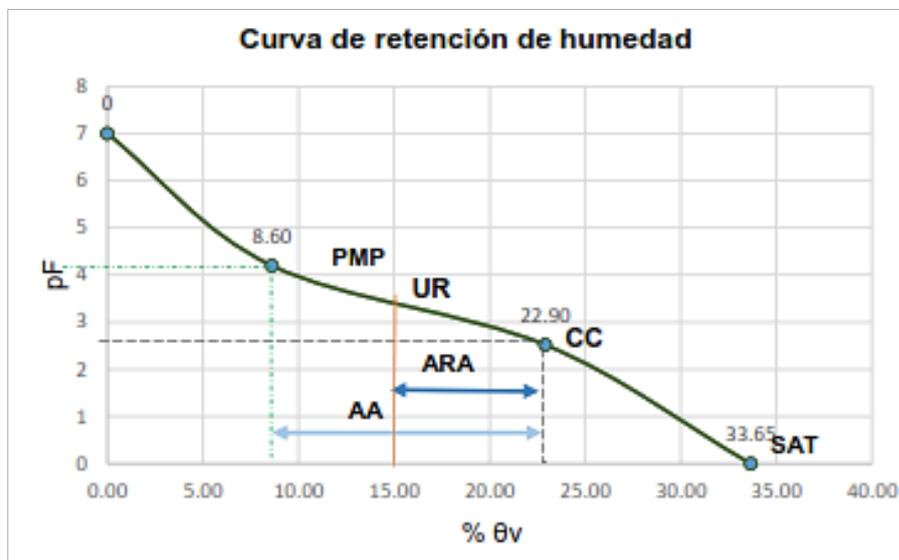
6.1.4.1. Curvas de retención de humedad antes del ensayo.

Las Figuras 9, 10 y 11 muestran las curvas de retención de humedad correspondientes a los perfiles uno, dos y tres, obtenidas previamente al ensayo.



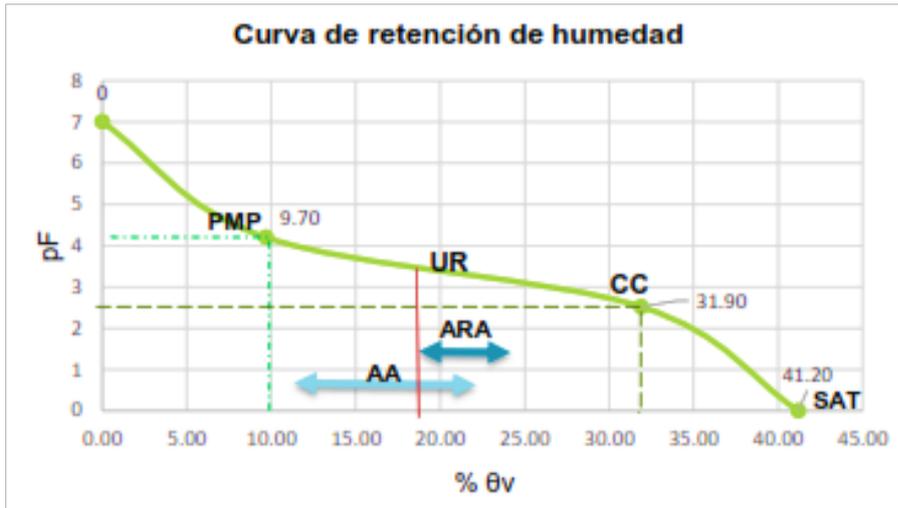
Fuente: Tomado de Obaco (2023).

Figura 9. Curva de retención de humedad de la calicata 1.



Fuente: Tomado de Obaco (2023).

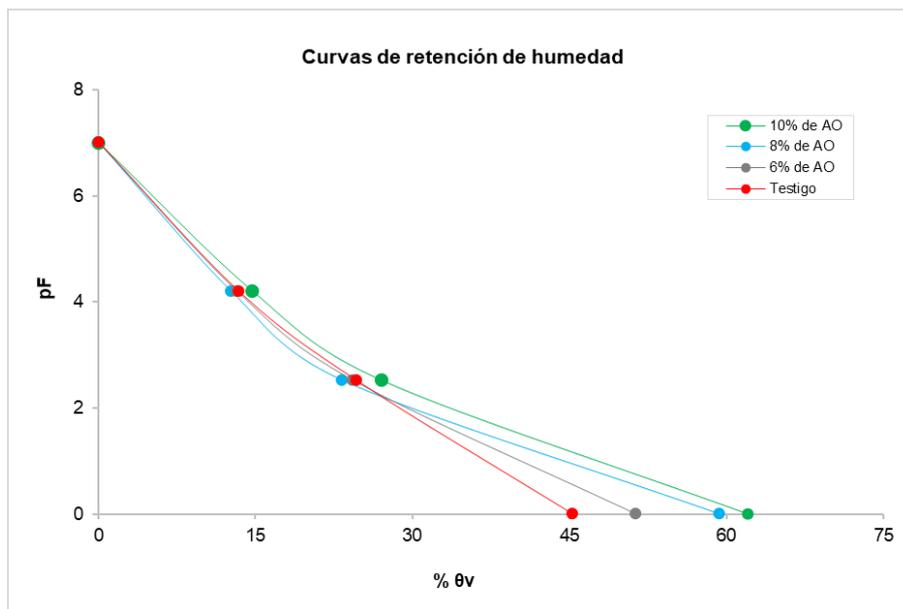
Figura 10. Curva de retención de humedad de la calicata 2.



Fuente: Tomado de Obaco (2023).

Figura 11. Curva de retención de humedad de la calicata 3.

6.1.4.2. Curvas de retención de humedad a los 180 días del ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Curvas de retención de humedad de los suelos del sistema agroforestal de la Quinta Experimental La Argelia a los 180 días después de iniciado el ensayo.

La Tabla 11 y la Figura 12 evidencian un aumento significativo en el contenido de humedad a saturación, con incrementos de 16,72; 14,02 y 6,01 %θv para los tratamientos con 10, 8 y 6 % de abono orgánico, respectivamente, en comparación con el suelo control. En cuanto al contenido de humedad a capacidad de campo, el tratamiento con 10 % de abono orgánico mostró un incremento matemático de 2,41 %θv frente al control; sin embargo, este aumento no fue estadísticamente significativo. Los tratamientos con 8 y 6 % de abono orgánico presentaron valores estadística y matemáticamente similares al control. De manera

similar, el contenido de humedad en el punto de marchitez permanente se incrementó matemáticamente en 1,31 % θ_v con el 10 % de abono orgánico, mientras que los tratamientos con 8 y 6 % mantuvieron niveles estadística y matemáticamente comparables al control.

6.2. Variables de crecimiento de la planta de café

En los análisis de varianza realizados para evaluar los incrementos en las variables de respuesta (Anexos 6, 7, 8, 9 y 10), se observa la ausencia de interacción entre los factores de estudio. Además, se evidencia que el factor de hongos micorrízicos arbusculares no tuvo un impacto significativo en los resultados, mientras que el factor de abono orgánico mostró efectos significativos y diferencias estadísticamente relevantes ($p \leq 0,05$) en la modificación de las variables de crecimiento de la planta, tales como la altura de la planta, el diámetro del tallo, y el número de nudos y hojas, con la excepción del número de ramas.

6.2.1. Altura de planta

La Tabla 12 muestra los incrementos en la altura del cultivo durante los primeros siete meses de plantación, destacando un aumento significativo en los tratamientos con dosis de 10, 8 y 6 % de abono orgánico. Estos tratamientos alcanzaron incrementos en la altura de 21,4; 20,8 y 20,1 cm, respectivamente, en comparación con el grupo control, que presentó un incremento de 18,1 cm. Cabe destacar que no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos con distintas dosis de abono orgánico.

Tabla 12. Valores de altura de la planta y prueba Tukey al 5 % de incrementos (0-210 días).

Tratamiento	Días								Evaluación estadística		
	0*	30*	60*	90*	120	150	180	210	Incremento (cm)	Dif vs Test.o	%
10 % de AO	24,5	26,2	27,7	29,3	30,2	34,5	39,5	45,9	21,4	A	18,7
8 % de AO	25,6	26,8	28,3	29,8	31,1	35,7	40,7	46,4	20,9	A	15,4
6 % de AO	26,1	27,3	28,6	29,9	31,0	35,1	41,1	46,2	20,1	AB	11,5
Testigo	26,5	27,9	29,2	30,4	31,1	35,0	39,7	44,5	18,1	B	0,0

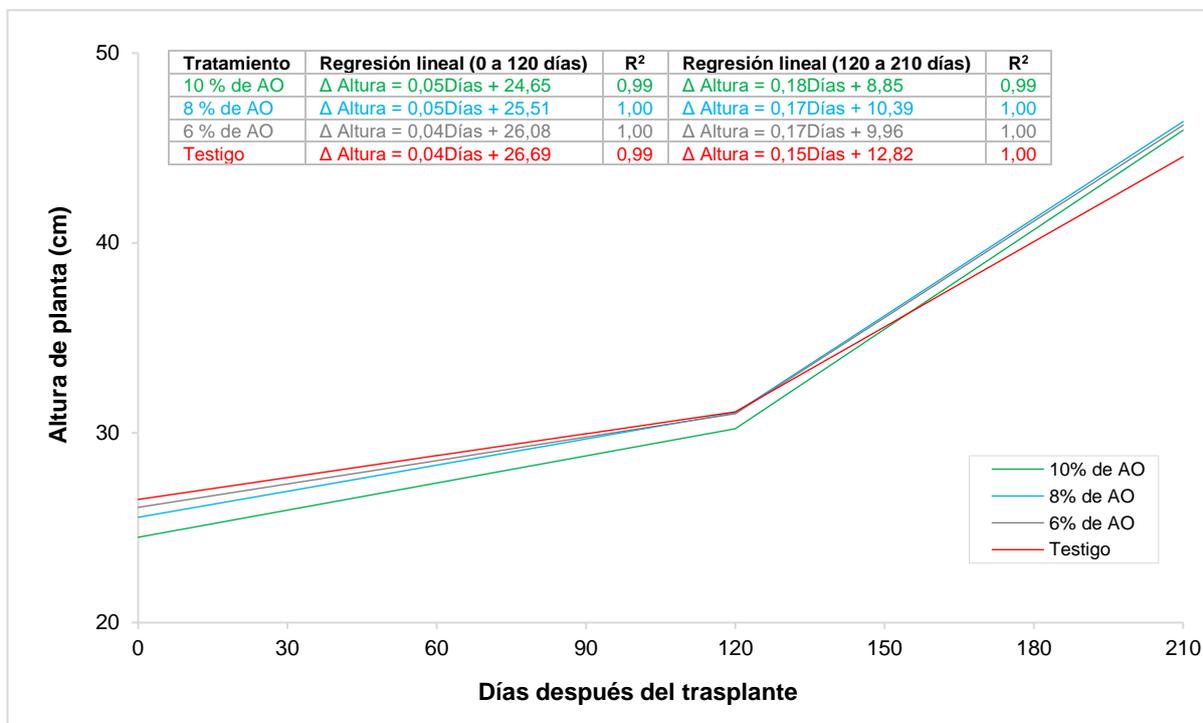
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Fuente: Elaboración propia; *Tomado de Obaco (2023).

En el análisis de regresión lineal (Figura 13), se compara la respuesta del crecimiento de la planta a diferentes niveles de abono orgánico. En esta figura, se observa que el cultivo presenta dos etapas de crecimiento bien definidas:

- Durante los primeros 120 días, el crecimiento es lento y uniforme, con un incremento diario en altura de 0,04 cm para el grupo control y el tratamiento con 6 % de abono orgánico, mientras que los tratamientos con 8 y 10 % de abono orgánico presentan un incremento diario de 0,05 cm.

- A partir de los 120 días, el cultivo experimenta un crecimiento acelerado, con un incremento diario en altura de 0,15 cm para el grupo control, 0,17 cm para los tratamientos con 6 y 8 % de abono orgánico, y 0,18 cm para el tratamiento con 10 % de abono orgánico.



Fuente: Elaboración propia; Valores a los 0, 30, 60 y 90 días corresponden a Obaco (2023).

Figura 13. Modelo de regresión lineal para el incremento de altura de planta (0-210 días).

6.2.2. Diámetro del tallo

La Tabla 13 presenta los incrementos en el diámetro del tallo, expresados en milímetros (mm), mostrando una tendencia hacia mayores aumentos en los tratamientos con dosis de 10 y 8 % de abono orgánico, con incrementos de 4,3 y 4,0 mm, respectivamente. En contraste, el grupo control registró un incremento de 3,2 mm.

Tabla 13. Valores de diámetro de tallo y prueba Tukey al 5 % de incrementos (0-210 días).

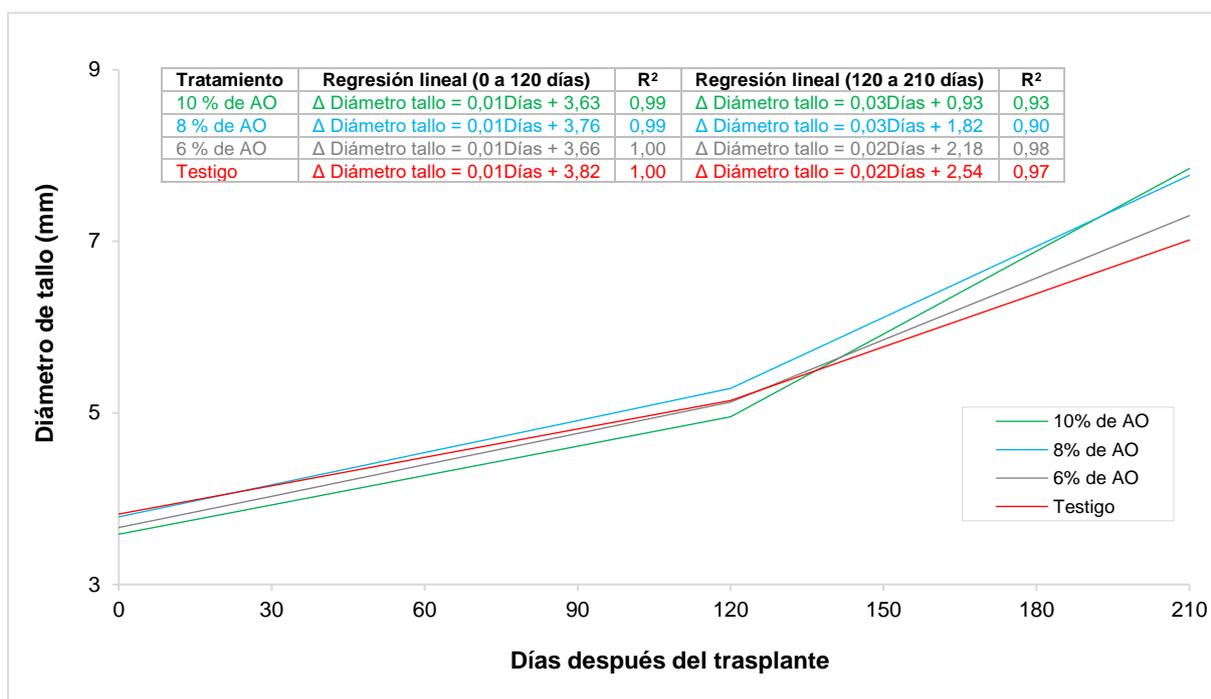
Tratamiento	Días								Evaluación estadística		
	0*	30*	60*	90*	120	150	180	210	Incremento (mm)	Dif vs Test.o	%
10 % de AO	3,6	4,0	4,4	4,7	5,0	5,5	6,2	7,9	4,3 A	1,1	33,5
8 % de AO	3,8	4,1	4,4	4,8	5,3	5,7	6,2	7,8	4,0 AB	0,8	24,6
6 % de AO	3,7	4,0	4,4	4,8	5,1	5,7	6,3	7,3	3,6 BC	0,4	13,8
Testigo	3,8	4,2	4,5	4,8	5,1	5,5	6,1	7,0	3,2 C	0,00	0,0

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Fuente: Elaboración propia; *Tomado de Obaco (2023).

En el modelo de regresión lineal para el diámetro de los tallos (Figura 14), se observa que la dinámica de crecimiento del grosor del tallo sigue un patrón similar al del crecimiento en altura, presentando dos etapas:

- Durante los primeros 120 días, se registró un incremento diario en el grosor del tallo de 0,01 mm para todos los tratamientos, incluido el grupo control.
- A partir de los 120 días, se observó un incremento diario en el grosor del tallo de 0,02 mm para el grupo control y el tratamiento con 6 % de abono orgánico, y de 0,03 mm para los tratamientos con 8 y 10 % de abono orgánico.



Fuente: Elaboración propia; Valores a los 0, 30, 60 y 90 días corresponden a Obaco (2023).

Figura 14. Modelo de regresión lineal para el incremento de diámetro de tallo (0-210 días).

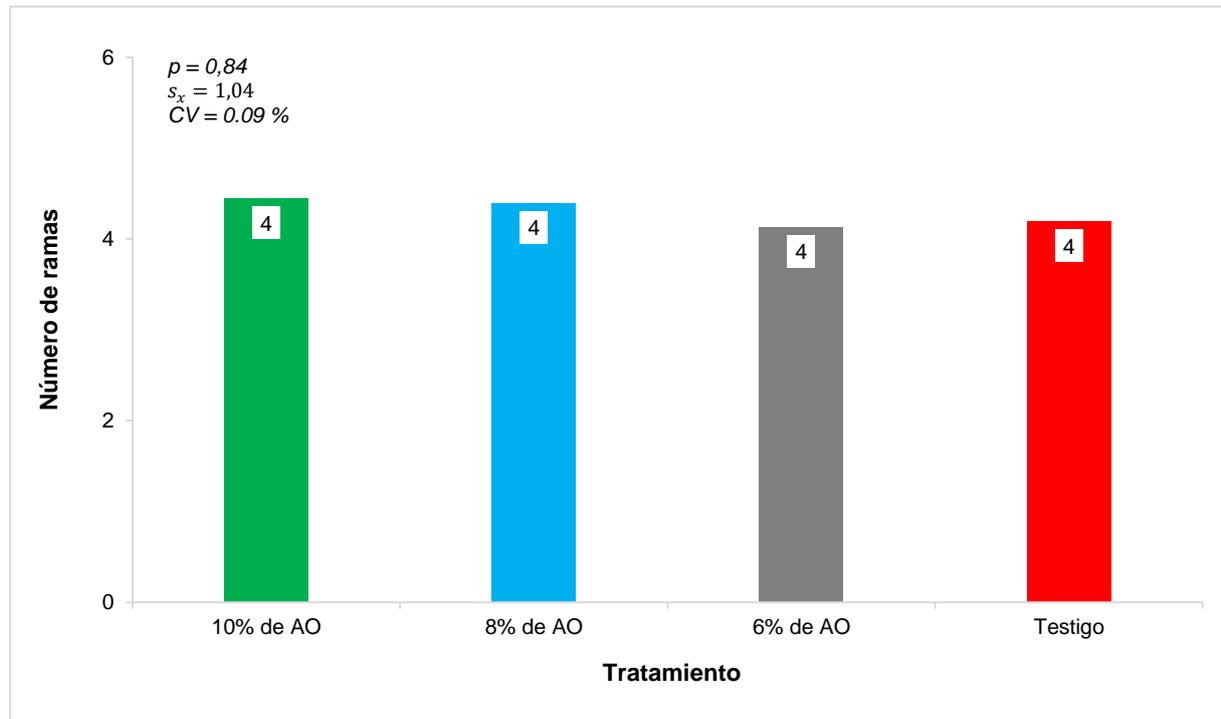
6.2.3. Número de ramas

El análisis de varianza realizado para evaluar el efecto de diferentes niveles de abono orgánico sobre el incremento del número de ramas (Anexo 7) no reveló diferencias significativas, con un p-valor de 0,84, superior al umbral de significancia establecido ($p \leq 0,05$). Este resultado indica que no hubo variaciones significativas entre los tratamientos, evidenciando una igualdad en los valores promedio de las medias. En consecuencia, se descartaron tanto la prueba de Tukey como el análisis de regresión lineal. En todos los tratamientos, incluido el grupo control, se registró un incremento uniforme de 4 ramas, como se ilustra en la Tabla 14 y Figura 15.

Tabla 14. Valores de número de ramas (0-210 días).

Tratamiento	Días								Incremento (# ramas)
	0*	30*	60*	90*	120	150	180	210	
10 % de AO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	3,0	4,0	4,0
8 % de AO	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	4,0
6 % de AO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	3,0	4,0	4,0
Testigo	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	3,0	4,0	4,0

Fuente: Elaboración propia; *Tomado de Obaco (2023).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Incremento número de ramas (0-210 días).

6.2.4. Número de nudos

En la Tabla 15 se expone el efecto de los diferentes niveles de abono orgánico sobre el incremento del número de nudos. Al comparar las medias, se observa una clara tendencia hacia un mayor incremento con las dosis de 10 y 8 % de abono orgánico, que aumentaron en 5 nudos. En contraste, los tratamientos con 6 % de abono orgánico y el grupo control mostraron un incremento de 4 nudos.

Tabla 15. Valores de número de nudos y prueba Tukey al 5 % de incrementos (0-210 días).

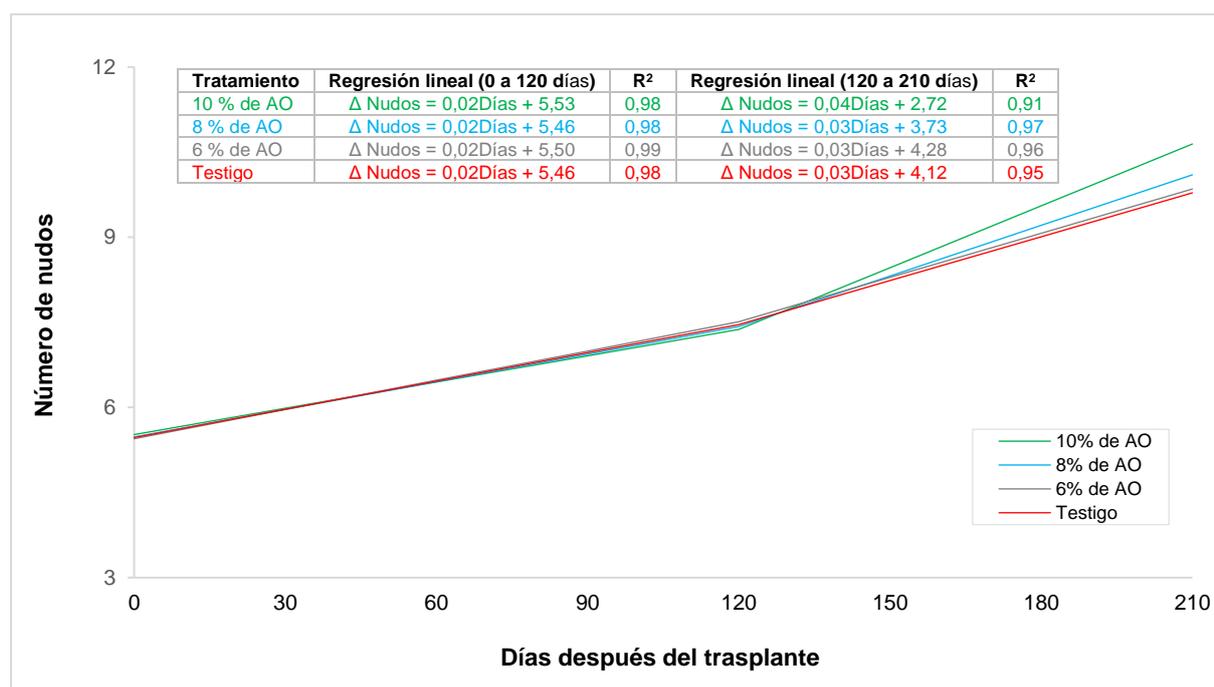
Tratamiento	Días								Evaluación estadística		
	0*	30*	60*	90*	120	150	180	210	Incremento (# nudos)	Dif vs Test.o	%
10 % de AO	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0	8,0	9,0	11,0	5,0 A	1,0	25,0
8 % de AO	5,0	6,0	7,0	7,0	7,0	8,0	9,0	10,0	5,0 A	1,0	25,0
6 % de AO	6,0	6,0	7,0	7,0	8,0	8,0	9,0	10,0	4,0 B	0,0	0,0
Testigo	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0	8,0	9,0	10,0	4,0 B	0,0	0,0

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

Fuente: Elaboración propia; *Tomado de Obaco (2023).

En la Figura 16, que representa el modelo de regresión lineal para el número de nudos, se observa lo siguiente:

- Durante los primeros 120 días, se registró un incremento diario de 0,02 nudos para todos los tratamientos, incluido el grupo control.
- A partir de los 120 días, el cultivo muestra una tendencia lineal creciente más pronunciada. Se observa que el tratamiento con 10 % de abono orgánico experimentó el mayor incremento diario, con 0,04 nudos, mientras que los tratamientos con 6 y 8 % de abono orgánico, así como el grupo control, mostraron un incremento de 0,03 nudos.



Fuente: Elaboración propia; Valores a los 0, 30, 60 y 90 días corresponden a Obaco (2023).

Figura 16. Modelo de regresión lineal para el incremento de número de nudos (0-210 días).

6.2.5. Número de hojas

En la Tabla 16 se presenta el efecto de los diferentes niveles de abono orgánico sobre el incremento del número de hojas. Al examinar las medias, se observa una clara tendencia

hacia un mayor incremento en el tratamiento con 10 % de abono orgánico, que registró un incremento de 10 hojas por planta. Por otro lado, los tratamientos con 8 y 6 % de abono orgánico, así como el grupo control, mostraron un incremento de 9 hojas.

Tabla 16. Valores de número de hojas y prueba Tukey al 5 % de incrementos (0-210 días).

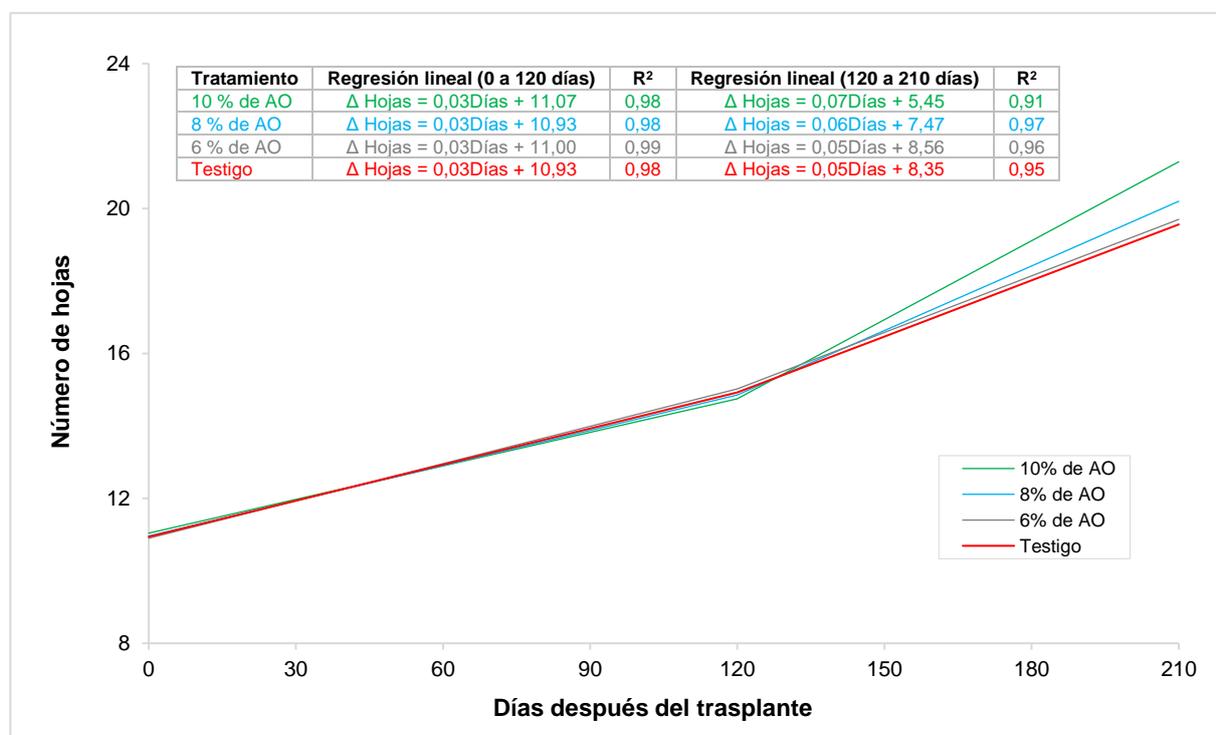
Tratamiento	Días								Evaluación estadística		
	0*	30*	60*	90*	120	150	180	210	Incremento (# hojas)	Dif vs Test.o	%
10 % de AO	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	21,0	10,0 A	1,0	11,1
8 % de AO	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	18,0	20,0	9,0 B	0,0	0,0
6 % de AO	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	20,0	9,0 B	0,0	0,0
Testigo	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	20,0	9,0 B	0,0	0,0

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Fuente: Elaboración propia; *Tomado de Obaco (2023).

El modelo de regresión lineal para el número de hojas (Figura 17) muestra un comportamiento homogéneo entre los tratamientos, evidenciando dos curvas de crecimiento:

- Durante los primeros 120 días, se observó un incremento diario de 0,03 hojas en todos los tratamientos, incluido el grupo control.
- A partir de los 120 días, el tratamiento con 10 % de abono orgánico mostró incrementos diarios de 0,07 hojas, mientras que el tratamiento con 8 % de abono orgánico experimentó incrementos de 0,06 hojas. Por su parte, los tratamientos con 6 % de abono orgánico y el grupo control aumentaron en 0,05 hojas.



Fuente: Elaboración propia; Valores a los 0, 30, 60 y 90 días corresponden a Obaco (2023).

Figura 17. Modelo de regresión lineal para el incremento de número de hojas (0-210 días).

7. Discusión

7.1. Factor no significativo (Hongos micorrízicos arbusculares)

La adición de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) no tuvo un efecto significativo en la variación de la densidad aparente ni en la porosidad total del suelo, a pesar de su potencial para mejorar la agregación del suelo. Según Sylvia et al. (2005) y Weil & Brady (2017), la densidad aparente está principalmente influenciada por factores como la compactación, la textura y el contenido de materia orgánica, los cuales no se modifican de manera sustancial por la actividad de los HMA. De manera similar, la porosidad del suelo, definida como la fracción de espacios porosos, se ve mayormente afectada por la textura, la compactación y las prácticas de manejo como la labranza (Oehl et al., 2003; Smith & Read, 2008). Sin embargo, Navarro (2020), afirma que los hongos micorrízicos arbusculares incrementan el espacio poroso en el suelo, puesto que crean redes de hifas que se extienden alrededor del sustrato contribuyendo a la formación de agregados al unir partículas y mejorar la porosidad, lo que aumenta la aireación y el drenaje.

En cuanto a las características físicas del suelo, como la capacidad de aireación, el volumen físicamente inerte y el agua aprovechable, tampoco se observó un efecto significativo debido a la presencia de HMA. Hillel (2003) señala que la capacidad de aireación está mayormente influenciada por la textura y la compactación del suelo, factores que no se ven considerablemente alterados por los HMA. Aunque estos hongos pueden mejorar la estructura del suelo, su efecto sobre la aireación es limitado. De manera similar, Dodd (2000) indica que el volumen físicamente inerte, relacionado con la estructura del suelo, no experimenta cambios significativos en presencia de HMA. Además, Weil y Brady (2017) subrayan que la cantidad de agua aprovechable para las plantas depende principalmente de la textura, el contenido de materia orgánica y la distribución de los poros, sin que los HMA tengan un efecto notable en esta característica física.

Respecto a la curva de absorción de humedad, la saturación del suelo, cuando todos los poros están llenos de agua, está principalmente determinada por la textura y el contenido de materia orgánica, sin que la actividad de los HMA genere cambios significativos (Johnson et al., 1997; Sylvia et al., 2005). De manera similar, la capacidad de campo, que es la máxima cantidad de agua que el suelo puede retener después de que se drene el exceso, depende en gran medida de las propiedades físicas del suelo, como su textura y estructura, y presenta un efecto limitado de los HMA (Johnson et al., 1997). Finalmente, el punto de marchitez permanente, que es el contenido de agua al que las plantas no pueden extraer más agua, está controlado principalmente por la textura del suelo y el contenido de materia orgánica. Aunque los HMA pueden mejorar la absorción de nutrientes y agua en las plantas, su efecto

sobre el PMP es mínimo, ya que este parámetro depende esencialmente de las características físicas del suelo (Marschner, 2012).

En esta investigación, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos con y sin HMA en el crecimiento y desarrollo vegetativo del cafeto. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Muleta et al. (2008) y Vallejos-Torres et al. (2019), quienes no detectaron diferencias significativas en la altura de la planta, el área foliar o la biomasa seca de *Coffea arabica* bajo condiciones controladas tras la aplicación de HMA, sugiriendo que la efectividad de estos hongos puede depender de factores específicos del entorno. En contraste, Trejo et al. (2011) demostraron en un estudio de invernadero que la aplicación de consorcios de HMA aumentó la altura de las plántulas de café en un 91 % en comparación con las plantas no inoculadas, mientras que Del Aguila et al. (2018) observaron un incremento del 10,65 % en la altura de las plantas inoculadas. Además, el área foliar de las plantas inoculadas aumentó entre el 77,45 y el 239,31 %, evidenciando efectos positivos en todos los tratamientos inoculados en comparación con el control.

La efectividad de los HMA en el crecimiento vegetativo de cultivos como el café puede verse afectada por varios factores. Entre ellos se incluyen la elección inapropiada del tipo de hongo, condiciones subóptimas del suelo (como pH, fertilidad y humedad), la competencia con micorrizas nativas, técnicas de inoculación incorrectas, el estado de salud de las plantas, la interferencia de fertilizantes químicos y un tiempo de evaluación insuficiente para observar los efectos. Todos estos factores pueden limitar la colonización de las raíces y, por lo tanto, la eficacia de los HMA en promover el crecimiento vegetativo del cultivo (J.A. García & García, 2008; ; Martínez & Rodríguez, 2017; Ocampo & Méndez, 2012; Sánchez & Fernández, 2015).

7.2. Factor significativo (Abono orgánico)

7.2.1. Densidad aparente (Da)

La aplicación de abonos orgánicos al 10 y 8 % mostró la mayor eficacia en la reducción de la densidad aparente (Da), con disminuciones de 0,19 y 0,13 g cm⁻³ respecto al suelo control, alcanzando valores de 1,00 y 1,06 g cm⁻³, clasificados como bajos según Alegre et al. (1986) y Cassel y Lal (1992). Este efecto se atribuye a la menor densidad del abono orgánico, que favorece el incremento de la porosidad del suelo (Abiven et al., 2009).

Resultados similares se reportaron en Azogues (Loja & Méndez, 2015), donde la aplicación de compost (40 t ha⁻¹) redujo la densidad aparente (Da) de 1,33 a 1,22 g cm⁻³. Otras enmiendas orgánicas, como el estiércol (20 t ha⁻¹), el bocashi (45 t ha⁻¹) y el biofertilizante (1,000 l ha⁻¹), lograron reducciones aún mayores, alcanzando valores de Da entre 1,05 y 1,09 g cm⁻³, cuatro meses después de la aplicación de las enmiendas.

Por otro lado, Zanor et al. (2018) no encontraron cambios significativos en la Da tras aplicar lombricomposta (4 t ha^{-1}), resultando en suelos con Da de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ (suelo testigo) y $1,07 \text{ g cm}^{-3}$ (suelo tratado con lombricomposta), probablemente debido al corto período de interacción (10 semanas).

En Coquimbo, Chile, Gubelin (2017) reportó reducciones importantes en la densidad aparente (Da) con compost ($5,7 \text{ t ha}^{-1}$). Durante la primera temporada (seis meses), se lograron reducciones significativas de la Da, pasando de $1,17 \text{ g cm}^{-3}$ en el testigo a $0,93$ y $0,84 \text{ g cm}^{-3}$ en los tratamientos con compost solo y compost más cultivo de cobertura (haba), respectivamente. Sin embargo, en la segunda temporada se observaron incrementos en la Da, lo cual se atribuyó probablemente al pisoteo durante el manejo del cultivo.

En investigaciones con abono verde (*Vicia sativa* y *Avena sativa*), Moya & Farinango (2010) documentaron una Da inicial de $0,69 \text{ g cm}^{-3}$. Posteriormente, transcurridos seis meses, evaluaron el efecto de diferentes abonos orgánicos y un fertilizante mineral sobre la Da. La aplicación de champiñonaza ($12,69 \text{ t ha}^{-1}$) alcanzó la reducción más significativa, con una Da de $0,67 \text{ g cm}^{-3}$. En contraste, compost ($10,52 \text{ t ha}^{-1}$) y humus de lombriz ($47,05 \text{ t ha}^{-1}$) mostraron ligeros incrementos, con valores que oscilaron entre $0,72$ y $0,74 \text{ g cm}^{-3}$.

Bravo & Rosillo (2010) reportaron una disminución en la Da de suelos con una densidad aparente inicial de $1,58 \text{ g cm}^{-3}$ tras la aplicación de arena sílicea, carbón vegetal y bocashi. El 8 % de bocashi redujo la Da a $1,29 \text{ g cm}^{-3}$, mientras que la combinación de arena, carbón vegetal y bocashi (25 %, $1,5 \text{ kg m}^{-2}$, 8 %, respectivamente) redujo la Da a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ en un lapso de siete meses. De manera similar, Villamagua et al. (2008), en la hoyo de Loja, reportaron una disminución significativa de la Da, de $1,33$ a $0,98 \text{ g cm}^{-3}$, con la aplicación de 6 % de bocashi y 15 t ha^{-1} de carbón vegetal en un periodo de nueve meses, lo que confirma la efectividad de estas enmiendas para mejorar la estructura del suelo.

7.2.2. Porosidad total (Pt)

La aplicación de abonos orgánicos demostró ser una estrategia efectiva para mejorar la porosidad total (Pt) del suelo, clave para mejorar la aireación y retención de agua. En este estudio, las dosis del 10 y 8 % incrementaron la Pt en 16,72 y 14,02 puntos porcentuales respecto al control, alcanzando valores de 62,03 y 59,33 %, superiores al rango ideal de 40-60 % señalado por Fimia et al. (2019). Estudios previos, como los de Alegre et al. (1986) y Fertilab (2010), también sugieren un valor óptimo cercano al 50 %. Shaxson y Barber (2008) destacan que maximizar la porosidad y recuperar biológicamente el suelo son esenciales para mejorar la productividad agrícola de manera sostenible.

En comparación con otros estudios, el aumento de Pt observado en nuestro trabajo es notable. Zanol et al. (2018) reportaron incrementos más modestos (de 0,65 a 4,5 %) con 4 t ha⁻¹ de lombricomposta en un período corto de interacción (10 semanas).

Bravo & Rosillo (2010) lograron incrementar la Pt de 45,25 % a un rango de 55 a 58 % mediante combinaciones de bocashi, arena y carbón vegetal, siendo el mayor aumento alcanzado con un 8 % de bocashi en un periodo de siete meses. Aunque estos incrementos son notables, no alcanzan el nivel observado en nuestro estudio, lo que resalta la efectividad de las dosis más altas de abono orgánico para mejorar la porosidad del suelo. Por otro lado, Villamagua et al. (2008) reportaron mejoras de hasta un 55 % con la aplicación de bocashi al 6 % y 20 t ha⁻¹ de carbón vegetal, durante un intervalo de nueve meses.

Nieto (2019) reportó un incremento del 7,06 % en la Pt tras aplicar biocarbón enriquecido a una dosis de 15 t ha⁻¹ en suelos sobrepastoreados, alcanzando un 48,7 % en un lapso de tiempo de 18 meses. Por otro lado, Sun & Lu (2014) documentaron un aumento del 6 % en la Pt al emplear biocarbón de paja (90-135 t ha⁻¹) en un suelo arcilloso tratado durante seis meses en condiciones de invernadero. Aunque ambos estudios muestran mejoras notables, los resultados obtenidos en nuestro trabajo con abonos orgánicos (AO) sugieren un mayor potencial para incrementar la Pt, lo cual podría estar relacionado con las propiedades específicas del abono orgánico utilizado.

7.2.3. Características físicas del suelo

- **Capacidad de aireación (θ_v):**

Las aplicaciones de abonos orgánicos al 10 y 8 % demostraron ser las más efectivas, incrementando la capacidad de aireación del suelo en un 14,33 y 14,30 % θ_v , respectivamente. Estos valores alcanzaron 35,00 y 34,97 % θ_v (Muy altos), superando ligeramente el rango ideal de 10-30 % θ_v establecido por Li et al. (2019). De acuerdo con Chavarría (2011), un aumento en la capacidad de aireación del suelo mejora los procesos de mineralización de nutrientes, un mecanismo llevado a cabo por bacterias aeróbicas. Estas bacterias descomponen la materia orgánica, transformándola en compuestos asimilables por las plantas, como nitritos y nitratos, esenciales para mantener la fertilidad del suelo y garantizar la disponibilidad de nutrientes. Resultados similares han sido reportados en otros estudios. Bravo & Rosillo (2010) observaron un aumento en la capacidad de aireación de 9 % a 12,25 % θ_v al aplicar una mezcla de 25 % de arena, 1,5 kg m⁻² de carbón vegetal y 8 % de bocashi, transcurridos siete meses después de la aplicación de la enmienda. De manera similar, Prado (2004) documentó que el uso de 1,5 kg de abono bocashi por planta incrementó la capacidad de aireación de 15 % θ_v (en el testigo) a 28 % θ_v en suelos del cantón Puyango, Loja.

- ***Volumen físicamente inerte:***

El volumen físicamente inerte (poros $<0,2 \mu\text{m}$, que no aportan aire ni agua) disminuyó en un 15,42 % θ_v respecto al control, alcanzando un valor de 52,66 % θ_v con la dosis del 10 % de abono orgánico. Este cambio refleja una mejora significativa en la estructura del suelo. Estudios previos respaldan esta tendencia. Bravo & Rosillo (2010) reportaron una disminución en el volumen físicamente inerte, pasando de 64 a 58 % θ_v con la dosis de 8 % de bocashi en un período de siete meses. Por su parte, Prado (2004) documentó una reducción del volumen físicamente inerte, de 65 % θ_v (en el testigo) a 50 % θ_v con la aplicación de abono bocashi (1,5 kg/planta).

- ***Agua Aprovechable:***

La disponibilidad de agua aprovechable mostró un incremento moderado del 1,10 % θ_v , alcanzando un valor de 12,34 % θ_v (Medio) con la aplicación del 10 % de abono orgánico, dentro del rango óptimo de 10-20 % θ_v propuesto por Cousin et al., 2022 y O'Geen, 2013. Este resultado minimiza el riesgo de estrés hídrico en las plantas. Bravo & Rosillo (2010) también reportaron aumentos modestos en el agua aprovechable, de 28 a 31 % θ_v , tras la aplicación de 8 % de bocashi, transcurridos siete meses. En contraste, Prado (2004) documentó un incremento del agua aprovechable de 20 a 22 % θ_v con la aplicación de abono bocashi (1,5 kg/planta).

- ***Condición física del suelo:***

Las aplicaciones de abonos orgánicos mejoraron las condiciones físicas del suelo, pasando de una clasificación inicial "pobre" a "media". Sin embargo, solo la dosis del 10 % mostró mejoras significativas en todos los parámetros evaluados. Este resultado coincide con los hallazgos de Bravo & Rosillo (2010), quienes aplicaron un 8 % de bocashi, solo o en combinación con arena y carbón vegetal, logrando una mejora significativa en sus tratamientos y una clasificación de suelo que pasó de "pobre" a "medio y bueno". Por otro lado, Prado (2004) logró una mejora significativa, elevando la categoría del suelo de "medio y bueno" a "muy bueno" según el diagrama triangular de evaluación, mediante aplicaciones de abono bocashi (1,5 kg/planta). De manera similar, Villamagua et al. (2008) encontraron que la combinación de bocashi (6 %) y carbón vegetal (0, 10, 15 y 20 t ha⁻¹) aumentó la clasificación de los suelos de "pobre" a "media" en nueve meses, subrayando la efectividad de estas enmiendas orgánicas en la rehabilitación de suelos degradados. En un estudio posterior, Villamagua et al. (2013), al aplicar 2 kg m⁻² de biocarbón (tamaños de partículas $\leq 2 \text{ mm}$ y $\geq 2,1 \leq 4,5 \text{ mm}$), mejoraron las condiciones físicas del suelo, pasando de "pobre" a "medio y bueno" en nueve meses, principalmente debido al incremento de la capacidad de aireación, que pasó

de bajo a medio y alto. En contraste, en el testigo que no recibió biocarbón, las condiciones físicas del suelo se mantuvieron en el rango de "pobre".

7.2.4. Curva de retención de humedad

- **Saturación:**

El tratamiento con un 10 % de abono orgánico (AO) alcanzó la mayor humedad a saturación, con un valor de 62,03 % θ_v , superando significativamente al control (45,31 % θ_v) y a los tratamientos de 8 % (59,33 % θ_v) y 6 % (51,32 % θ_v). Este incremento refleja una mayor capacidad de retención hídrica, lo que es crucial para el desarrollo radicular y la disponibilidad de agua en el suelo. En comparación, Benedicto-Valdés et al. (2019) observaron incrementos más modestos con estiércol bovino, que aumentó de 35,9 a 54,8 % θ_v , 95 días después de la aplicación. Por otro lado, Bravo & Rosillo (2010) reportaron mejoras con bocashi (8 %), elevando la humedad a saturación de 46 a 58 % θ_v en un periodo de siete meses. En contraste, Prado (2004) documentó una disminución de la humedad a saturación, pasando de 65 a 50-59 % θ_v en suelos tratados con bocashi (0,5; 1,0 y 1,5 kg/planta) en cultivos de pimiento híbrido.

- **Capacidad de campo (CC):**

El tratamiento con un 10 % de AO mejoró la capacidad de campo en un 2,41 % θ_v respecto al control, alcanzando un valor de 27,04 % θ_v . Los tratamientos al 8 y 6 % no presentaron diferencias significativas frente al control. Benedicto-Valdés et al. (2019) también observaron incrementos en la capacidad de campo con estiércol bovino, que pasó de 19,7 a 23,15 % θ_v , transcurridos 95 días desde la aplicación. Bravo & Rosillo (2010) reportaron aumentos notables en la capacidad de campo con bocashi (8 %), pasando de 38 a 47 % θ_v , tras siete meses. En contraste, Prado (2004) registró una reducción en los valores de capacidad de campo en suelos tratados con bocashi (0,5; 1,0 y 1,5 kg/planta), que variaron de 29 a 35 % θ_v , frente al testigo que alcanzó 50 % θ_v .

- **Punto de marchitez permanente (PMP):**

El 10 % de AO presentó un ligero incremento en el punto de marchitez permanente, alcanzando 14,70 % θ_v , mientras que los tratamientos de 8 y 6 % mantuvieron valores cercanos al control (13,39 % θ_v). Benedicto-Valdés et al. (2019) reportaron aumentos en el PMP con estiércol bovino, que pasaron de 9,9 a 12,16 % θ_v , transcurridos 95 días desde la aplicación. Bravo & Rosillo (2010) registraron incrementos en el PMP en todos sus experimentos con arena silíceo, carbón vegetal y bocashi (8 %), alcanzando valores entre 10 y 16 % θ_v en el transcurso de siete meses. Prado (2004), por su parte, observó valores que

variaron entre 9 y 14 %θv en sus tratamientos con bocashi (0,5; 1,0 y 1,5 kg/planta), mientras que el testigo mostró un valor significativamente más alto (30 %θv). Estos hallazgos resaltan la influencia del abono orgánico en la mejora de los parámetros hídricos del suelo, con diferencias notables según el tipo y la dosis de tratamiento aplicado.

7.2.5. Variables de crecimiento de la planta de café

En las primeras etapas, el crecimiento del café es lento y uniforme, independientemente del tipo de fertilización, ya que las plántulas requieren pocos nutrientes debido al desarrollo limitado de sus órganos. A partir de los 172 días, el suministro de fertilizantes comienza a influir significativamente, observándose un patrón de crecimiento similar en el diámetro del tallo y la altura de las plantas (Encalada et al., 2018).

7.2.5.1. Altura de planta.

Los resultados del presente estudio evidencian un aumento significativo en la altura de las plantas con las aplicaciones del 10 y 8 % de abono orgánico (AO), alcanzando 21,4 y 20,9 cm, respectivamente, frente a 18,1 cm en el control. Estos datos respaldan investigaciones previas que destacan los efectos positivos del AO en el desarrollo vegetal.

Uscumayta (2018) reportó resultados similares en *Coffea arabica* L. ocho meses después del abonamiento, donde las dosis de 1 200 y 800 g de compost incrementaron las alturas a 99,63 y 98,24 cm, respectivamente, superando significativamente las obtenidas con 0 y 400 g, que fueron de 91,99 y 93,81 cm.

De manera similar, Canseco et al. (2020) evaluaron varios abonos orgánicos, como lombricomposta (L) 2 kg, natur-abono (Na) 2 kg, Bio-Orgamin (Bo) 2 kg y guano de murciélago (Gm) 2 ml, además de biofertilizantes a base de *Azotobacter* sp. (Az) 4 ml y *Glomus cubense* (Gc) 10 g. La combinación Gm + L + Gc (360 días después de la aplicación) destacó al alcanzar 216 cm de altura, evidenciando una sinergia efectiva entre estos insumos en el desarrollo de *Coffea arabica* L. Los tratamientos que mostraron los valores más bajos fueron L (120 cm), L + Az (140 cm) y L + Gc (133 cm).

7.2.5.2. Diámetro del tallo.

Los resultados de este estudio muestran un aumento significativo en el diámetro del tallo de las plantas de café con las aplicaciones de 10 y 8 % de abono orgánico (AO), logrando incrementos de 4,3 y 4,0 mm, respectivamente, frente a los 3,2 mm registrados en el grupo control. Estos hallazgos concuerdan con los reportados por Uscumayta (2018), quien observó que dosis crecientes de compost mejoraron notablemente el diámetro del tallo en *Coffea arabica* L (ocho meses). En su estudio, la aplicación de 1 200 g de compost por planta alcanzó

un diámetro promedio de 21,01 mm, superando las dosis de 0 y 400 g, que registraron 17,89 y 19,44 mm, respectivamente.

En contraste, Canseco et al. (2020) evaluaron el efecto de abonos orgánicos y biofertilizantes en *Coffea arabica* L. (variedad Typica) durante 12 meses. En su estudio, el diámetro más grande observado fue de 3,16 cm en el grupo testigo. Sin embargo, las combinaciones de abonos orgánicos y biofertilizantes resultaron en diámetros menores, destacando los valores más bajos en los tratamientos con Guano de murciélago + *Azotobacter* sp. (2,30 cm), Guano de murciélago + *Glomus cubense* (2,23 cm) y Lombricomposta + *Glomus cubense* (2,16 cm). Estos resultados difieren de los hallazgos de nuestro estudio, lo que sugiere que la interacción entre ciertos abonos orgánicos y biofertilizantes puede no ser tan efectiva para promover el crecimiento en diámetro del tallo como los tratamientos aplicados exclusivamente con abonos orgánicos. Sin embargo, estas diferencias podrían explicarse por variaciones en las condiciones de cultivo, el tipo de abono utilizado y las interacciones específicas entre los insumos y las plantas.

Por otro lado, Cosme et al. (2020) analizaron el efecto de un abono orgánico acelerado en *Coffea arabica* L. (variedad Catimor) cultivada en invernadero, y encontraron que no hubo diferencias significativas en el diámetro del tallo entre los tratamientos con y sin abono durante un periodo de 75 días. Los valores registrados fueron de 5,74 mm para el tratamiento con abono y 5,41 mm para el testigo. Este resultado destaca la importancia de seleccionar y manejar adecuadamente el tipo de abono orgánico, ajustándolo a las necesidades particulares del cultivo para optimizar su efectividad.

7.2.5.3. Número de ramas.

En este estudio, todos los tratamientos, incluido el grupo control, resultaron en un incremento igual en el número de ramas, con un aumento promedio de 4 ramas por planta. Este hallazgo difiere significativamente de investigaciones previas, lo que sugiere que las dosis de abono orgánico evaluadas no influyeron de manera diferenciada en la ramificación de las plantas de café.

Uscumayta (2018) reportó resultados ligeramente diferentes. En su estudio, durante un periodo de 8 meses, el número de ramas fue estadísticamente similar entre las plantas tratadas con compost a dosis de 400, 800 y 1 200 g por planta (con un promedio de 5 ramas). Sin embargo, se observó una diferencia significativa en comparación con el tratamiento sin compost (0 g), que registró un promedio de 4,32 ramas. Este hallazgo sugiere que, aunque el efecto fue moderado, la aplicación de compost tuvo un impacto positivo en la ramificación de las plantas.

Por otro lado, Núñez (2022) evaluó diferentes tipos de fertilización en *Coffea arabica* L., comparando tratamientos químicos (NPK 10-30-10), orgánicos (Champiñonaza), mixtos

(NPK + Champiñonaza) y un testigo sin fertilizante. Las dosis aplicadas por planta fueron 501 g de NPK, 6 kg de Champiñonaza y 252 g de NPK + 3 kg de Champiñonaza, distribuidas en tres aplicaciones anuales. Los resultados indicaron que los tratamientos orgánicos y mixtos no presentaron diferencias significativas en el número de ramas en ningún periodo evaluado. Sin embargo, el tratamiento químico mostró un incremento significativo, alcanzando un promedio de 53,89 ramas plagiotrópicas a los 270 días después de la aplicación del fertilizante ($p = 0,005$). Este resultado resalta la superioridad de la fertilización química en la promoción de la ramificación, en comparación con los tratamientos orgánicos y mixtos.

7.2.5.4. Número de nudos.

Este estudio evidenció que las dosis más altas de abono orgánico (AO), del 10 y 8 %, promovieron un incremento significativo en el número de nudos en las plantas de café, con un promedio de 5 nudos adicionales. En comparación, los tratamientos con 6 % de AO y el grupo control mostraron aumentos más modestos, con un promedio de 4 nudos. Estos resultados sugieren que las dosis elevadas de AO estimulan un mayor desarrollo estructural en las plantas, favoreciendo la formación de nudos.

Estos hallazgos son consistentes con los de Núñez (2022), quien evaluó los efectos de diferentes tratamientos en plantas de café utilizando fertilización química (NPK 10-30-10), orgánica (Champiñonaza), mixta (NPK + Champiñonaza) y un testigo. A los 90 días, no se observaron diferencias significativas en el número de nudos entre los tratamientos. Sin embargo, a los 180 días, se encontraron diferencias altamente significativas ($p = 0,005$), encabezadas por el tratamiento químico, seguido de los tratamientos orgánico y mixto. A los 270 días, el tratamiento químico continuó mostrando diferencias altamente significativas, mientras que los tratamientos orgánico y mixto presentaron incrementos más modestos. Esto indica que el tipo de fertilizante y el tiempo de aplicación influyen considerablemente en el desarrollo de los nudos, siendo los fertilizantes químicos más efectivos a largo plazo.

Por otro lado, Canseco et al. (2020) evaluaron el impacto de diversos abonos orgánicos y biofertilizantes en *Coffea arabica* L., variedad Typica, en plantas establecidas en campo y renovadas tres años atrás. Los resultados no mostraron diferencias estadísticamente significativas en el número de nudos a los 210 días después de la aplicación (dda). Sin embargo, la combinación de Guano de murciélago, Lombricomposta y *Glomus cubense* presentó el valor más alto con 56,33 nudos, aunque sin alcanzar significancia estadística. En contraste, las dosis de abono orgánico del 10 y 8 % en nuestro estudio mostraron un incremento claro y significativo en el número de nudos. Estas diferencias podrían atribuirse a factores como el tipo de abono orgánico, las condiciones de cultivo y el historial de manejo de las plantas.

7.2.5.5. Número de hojas.

Al examinar las medias obtenidas en este estudio, se observa una tendencia clara hacia un mayor incremento en el número de hojas por planta con la dosis de 10 % de abono orgánico (AO), alcanzando una adición de 10 hojas por planta. En contraste, los tratamientos con 8 y 6 % de AO, así como el grupo control, mostraron un incremento más modesto, de 9 hojas por planta. Estos resultados sugieren que una mayor concentración de AO tiene un efecto más pronunciado en la promoción del crecimiento foliar en las plantas de café.

Estos hallazgos son consistentes con los resultados de Uscumayta (2018), quien observó que un aumento en las dosis de compost estaba correlacionado con un incremento en el número de hojas en planta (ocho meses). En su estudio, las dosis de 800 y 1 200 g de compost resultaron en promedios de 5,03 hojas por planta, mostrando diferencias estadísticamente significativas en comparación con las dosis más bajas de 0 g y 400 g, que presentaron promedios de 4,71 y 4,97 hojas, respectivamente. Aunque los valores absolutos reportados por Uscumayta son inferiores a los obtenidos en este estudio, la tendencia es similar, lo que sugiere que un mayor aporte de compost o fertilizantes orgánicos favorece el crecimiento foliar en las plantas de café.

8. Conclusiones

- Se observó que no hubo interacción significativa entre los factores evaluados. A pesar del conocido potencial de los hongos micorrízicos arbusculares para promover la simbiosis suelo-planta, en este estudio no se evidenció un impacto relevante en el desarrollo del cultivo de café.
- El abono orgánico (AO), particularmente en una dosis del 10 %, contribuyó significativamente a la mejora de las propiedades físicas e hidrofísicas del suelo. Este tratamiento optimizó la densidad, la porosidad, la capacidad de aireación y el volumen físicamente inerte, además de incrementar la humedad a saturación y la capacidad de campo, lo que resultó en una mejora general de la condición física del suelo. Todos los tratamientos pasaron de una clasificación "pobre" a "media".
- La aplicación de AO al 10 % también tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento de las plantas de café, al incrementar su altura, diámetro basal y número de hojas. Este resultado sugiere que el AO podría ser una herramienta eficaz para mejorar el crecimiento vegetativo y el rendimiento de los cultivos de café.

9. Recomendaciones

Con base en las experiencias obtenidas a lo largo del desarrollo del estudio, se proponen las siguientes acciones:

- Seleccionar plantas con características homogéneas en cuanto a altura, número de hojas, grosor del tallo, entre otros factores, para el trasplante. Esto permitirá una evaluación más precisa de los efectos de los tratamientos aplicados y reducirá posibles variaciones en los resultados del estudio.
- Realizar la inoculación de hongos micorrízicos en viveros o entornos controlados para garantizar una interacción eficiente con las raíces. Esta práctica mejora la adaptación de las plantas al campo y favorece su establecimiento en el terreno definitivo.
- Establecer un monitoreo continuo de las propiedades físicas e hidrofísicas del suelo, así como del desarrollo del cultivo de café. Este seguimiento a largo plazo permitirá evaluar el impacto de los tratamientos y ajustar las estrategias agrícolas para maximizar los resultados.

10. Bibliografía

- Aguilar, J. (2014). *EFFECTO DE TRES SISTEMAS DE LABRANZA EN LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA, DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD DE UN SUELO FRANCO-ARCILLOSO* [UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1872/K%2040033%20Aguilar%20Zavala%2c%20Jos%2c%20a9%20Juan.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Alegre, J. C., Cassel, D. K., & Bandy, D. E. (1986). Effects of Land Clearing and Subsequent Management on Soil Physical Properties 1. *Soil Science Society of America Journal*, 50(6), 1379–1384. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000060002x>
- Arcila, J. (2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. *Sistemas de Producción de Café En Colombia*, 22–60.
- Arcila-Pulgarín, J., & Jaramillo-Robledo, Á. (2003). *RELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD DEL SUELO, LA FLORACIÓN Y EL DESARROLLO DEL FRUTO DEL CAFETO*. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4215/1/avt0311.pdf>
- Ayuso, F. (2015). *Efecto de enmiendas orgánicas y de un hongo.pdf*. 65, 82–91.
- Balcázar, L., & Valarezo, C. (2010). *Flujos laterales de agua en dos suelos típicos de un bosque primario de montaña en la reserva biológica San Francisco, en el sur del Ecuador. September*, 1–96. <https://doi.org/10.13140/2.1.4605.6006>
- Barrer, S. (2009). El Uso De Hongos Micorrízicos Arbusculares Como Una Alternativa Para La Agricultura. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 7(1), 124–132.
- Bautista, M. I. (2022). Relación entre la consistencia y la humedad del suelo. *Universitat Politècnica de València*.
- Bejar, S. J., Cantú, I., Yáñez, M. I., & Luna, E. O. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59), 30–50. <https://doi.org/doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>
- Benedicto-Valdés, G. S., Montoya-García, C. O., Vicente-Hernández, Z., Ramírez-Ayala, C., & Escalante-Estrada, J. A. S. (2019). Incorporación de abonos orgánicos y liberación de C-CO₂ como indicador de la mineralización del carbono. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(18). <https://doi.org/10.19136/era.a6n18.2022>

- Berendsen, R. L., Pieterse, C. M., & Bakker, P. A. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17(8), 478–486. <https://doi.org/10.1016/J.TPLANTS.2012.04.001>
- Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., & Tuteja, N. (2014). *Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity*. 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-66>
- Borrero, C. A. (n.d.). *Abonos orgánicos*. InfoAgro. Retrieved November 30, 2022, from https://www.infoagro.com/documentos/abonos_organicos.asp
- Bravo, E., & Rosillo, J. (2010). *Respuesta del tomate de mesa (solanum lycopersicum L.) bajo invernadero al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo mediante la aplicación de arena silíceo y láminas de riego en la estación experimental "la Argelia"*. Universidad Nacional de Loja.
- Cabrera, G. (2019). Efecto de abonos orgánicos mejorados en la producción de Coffea arabica L. variedad Costa Rica 95 en Satipo. *Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional Del Centro de Perú*, 76.
- Calderón, T., & Loján, P. (2022). *EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA APLICACIÓN DE VERMICOMPOST ENRIQUECIDO CON BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL Y HONGOS MICORRÍZICOS EN EL DESARROLLO DEL CAFÉ (Coffea arabica)*. www.ediloja.com.ec
- Camacho-Tamayo, J. H., Forero-Cabrera, N. M., Ramírez-López, L., & Rubiano, Y. (2017). Evaluación de textura del suelo con espectroscopía de infrarrojo cercano en un oxisol de Colombia. *Colombia Forestal*, 20(1), 5–18. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.1.a01>
- Canseco, D., Yuri, A., Castañeda, E., Carrillo, J., Robles, C., & Santiago, G. (2020, September 27). Respuesta de Coffea arabica L. a la aplicación de abonos orgánicos y biofertilizantes. *Revista Mexicana. Ciencias Agrícolas. Volumen 11. Número 6*, 1–14.
- Carreón-Abud, Y., Rojas-Jacuinde, N. R., Alvarado-Herrejón, M., & García-Rueda, S. E. (2016). Función de los hongos micorrízicos arbusculares en la biorremediación de metales pesados. *Biológicas*, 18(2), 16–22. https://www.biologicas.umich.mx/index.php?journal=biologicas&page=article&op=view&path%5B%5D=BiologicasVol18No2_2106_16-22&path%5B%5D=207

- Cassel, D. K., & Lal, R. (1992). Soil Physical Properties of the Tropics: Common Beliefs and Management Restraints. *Myths and Science of Soils of the Tropics, (Myths and science)*, 61–89.
- Castro, C. V., & Barrenzueta, S. (2020). Aspectos sociales y económicos: Caso productores de café en la provincia El oro. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(1), 71–75.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.). (2019). Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila. *Cenicafé*, 1, 52–79. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0005>
- Chavarría, F. (2011). *Edafología 1* (Universidad en el Campo, Ed.; Primera Edición).
- Cortina, A., Acuña, J., Moncada, M., Herrera, J., & Molina, D. (2013). *Variedades de café: Desarrollo de variedades*. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_09
- Cosme, R., Reynoso, A., Adama, E., & Pocomucha, V. (2020). Efecto del abono orgánico acelerado en plántulas de café (*Coffea arabica* L.). *Anales Científicos*, 81(2), 376–384. <https://doi.org/10.21704/ac.v81i2.1667>
- Cousin, I., Buis, S., Lagacherie, P., Doussan, C., Le Bas, C., & Guérif, M. (2022). Available water capacity from a multidisciplinary and multiscale viewpoint. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1), 1–29. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00774-8/Published>
- Cubillo, M., & Gutiérrez, O. (2011). *EVALUACION DE SUSTRATOS PARA LA PRODUCCIÓN DE PLANTULAS DE CAFE* [Universidad Nacional Agraria]. <https://repositorio.una.edu.ni/832/1/tnf01c962.pdf>
- Del Aguila, K., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L., & Becerra, A. (2018). Inoculación de Consorcios Micorrízicos Arbusculares en *Coffea arabica*, Variedad Caturra en la Región San Martín. *Información Tecnológica*, 29(1), 137–146. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000100137>
- Díaz, G. M. (2015). *Ajuste de un modelo de humedad del suelo unidimensional en localidades de la provincia de Entre Ríos utilizando observaciones in-situ y sensoramiento remoto*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. https://hdl.handle.net/20.500.12110/seminario_nATM000001_Diaz

- Dodd, J. C. (2000). The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Agro and Natural Ecosystems. *Outlook on Agriculture*, 29(1), 55–62.
- Duarte-González, D. (2021). *Mathematical model of electrical conductivity as a function of water*. November.
- Echeverri, D., Buitrago, L., Montes, F., Mejía, I., & González, M. del P. (2005). Café Para Cardiólogos. *Revista Colombiana de Cardiología*, 11(8), 357–365.
- Ek Chim, J. (2019). *Establecimiento de la producción de hongos micorrícicos arbusculares asociados a cocotero a través de cultivos trampa*. 98.
- Encalada, M., Fernández, P., Jumbo, N., Alejo, A., & Reyes, L. (2018). Evaluación del crecimiento de plántulas de Coffea arabica L. c.v. caturra en condiciones de vivero con diferentes sustratos y recipientes. *BOSQUES LATITUD CERO*, 8(1), 1–15.
- FAO. (s.f.). *Glosario de términos sobre humedad del suelo*. Retrieved June 25, 2022, from <https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s02.htm>
- Fertilab. (2010). Interpretación De Resultados De Textura Y Humedad Del Suelo. *Fertilab*, 4.
- Figueroa-Hernández, E., Pérez-Soto, F., & Godínez-Montoya, L. (2016). *La producción y el consumo del café*. www.ecorfan.org/spain
- Fimia, T., Cagnoli, L., Zappeli, L., Monzón, R., Soto, T., & Monín, L. (2019). *ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICA, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL SUELO TRAS LA ADICIÓN DE COMPOST*.
- García, J. A., & García, E. (2008). *Micorrizas: Ecología y Aplicaciones*. Mundi-Prensa.
- García, M., Puppo, L., Hayashi, R., & Morales, P. (2012). *Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo*.
- García, D. (2017). Micorrizas, los Biofertilizantes del Futuro que Vienen del Pasado. *Serie Nutrición Vegetal Núm. 90.*, México. 5 p.
- Gilsanz, J. C., Leoni, C., Schelotto, F., & Acuña, A. (2013). Potential Uses of Sewage Sludge in Agricultural Production. *Agrociencia Uruguay*, 17(2), 1–10. <https://doi.org/10.31285/agro.17.457>
- Giménez, R. (2013). *Física del Suelo*. 16.

- Gómez, D., & Vásquez, M. (2011). Abonos orgánicos. *Sistema de Agronegocios Agrícolas*, 27.
- González, J. (2019). *EVALUACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE CULTIVO DSSAT SUBSTOR –POTATO BAJO CONDICIONES ANDINAS*. 15.
- González, O., Iglesias, C. E., & Herrera, M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18, 57–63.
- Gubelin, K. (2017). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO CON APLICACIÓN DE COMPOST Y CULTIVO DE COBERTURA EN UN PARRÓN DE UVA DE MESA*. Universidad de Chile.
- Gudelj, O., Arce, J., & Gudelj, V. (2018). *Metodología de muestreo y determinación de agua del suelo*. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_mj_muestreosuelos18.pdf
- Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Ferrera-Cerrato, R., Rivera-Fernández, A., & González-Chávez, M. C. (2018). HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN EL CRECIMIENTO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) VARIEDADES GARNICA, CATIMOR, CATURRA Y CATUAÍ. *Agroproductividad*, 11(July), 61–67.
- Hillel, D. (2003). *Introduction to Environmental Soil Physics*.
- Ingaramo, O. E., Paz, J., Mirás, J. M., & Vidal, E. (2007). Caracterización de las propiedades generales del suelo en una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo. *Cadernos Do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 32(32), 127–137.
- Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2021). *Hoja Geológica Gonzanamá*.
- INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA (IICA). (2019). *Manual de producción sostenible de café*. <http://www.iica.int>
- INTAGRI. (2017). *Propiedades Físicas del Suelo y el Crecimiento de las Plantas | Intagri S.C.* <https://www.intagri.com/articulos/suelos/propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas>
- Izquierdo, J., Javela, L. N., & Oviedo, Y. A. (2011). Curvas características de humedad como herramienta de optimización y determinación del tiempo de riego. In *Ingeniería y Región* (Vol. 8, pp. 103–111). <https://doi.org/10.25054/22161325.793>

- Johnson, N. C., Graham, J. H., & Smith, F. A. (1997). Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism-parasitism continuum. *New Phytologist*, 135(4), 575–585. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00729.x>
- Koni, A. (2006). *Agricultura Orgánica, El Suelo: sus componentes físicos*.
- Lagos, T. C., Criollo, H., García, J., Muñoz, J., López, J., Benavides, V., & Dulce, J. (2019). El cultivo del café (*Coffea arabica* L.) en Nariño - Cartilla divulgativa. In *El Cultivo del Café (Coffea arabica* L.) en Nariño.
- Lalangui, C. (2018). Aislamientos e identificación de morfotipos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en tres zonas riparias del cantón Loja enfocados a la producción de bioinoculantes. *Universidad Nacional De Loja*.
- Leanne, U. (2020). *¿Por qué estudiar las propiedades físicas del suelo?* <http://portal.amelica.org/ameli/journal/343/3431370003/html/>
- Lema, V. (2019). *Informe de rendimientos objetivos de café (grano oro) 2019*. 8.
- Li, Y., Niu, W., Cao, X., Wang, J., Zhang, M., Duan, X., & Zhang, Z. (2019). Effect of soil aeration on root morphology and photosynthetic characteristics of potted tomato plants (*Solanum lycopersicum*) at different NaCl salinity levels. *BMC Plant Biology*, 19(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1927-3>
- Loja, C., & Méndez, K. (2015). *PRIMEROS CAMBIOS EN LA CANTIDAD DE BACTERIAS, HONGOS, MACROINVERTEBRADOS Y PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO LUEGO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS ORGÁNICAS EN UN SUELO PREVIAMENTE MANEJADO DE FORMA CONVENCIONAL [UNIVERSIDAD DE CUENCA]*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22907/1/Tesis.pdf>
- López, M. A. (2016). *DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LOS MÉTODOS DE OLLAS ISOBÁRICAS Y CENTRÍFUGA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE TRABAJO*. May, 31–48.
- Magallanes, J. L. (2018). Propiedades físicas de los suelos, un recurso natural prestador de servicios biológicos y ambientales. *Universidad Autónoma de Sinaloa, March*, 1–8.
- Marschner, P. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants Third Edition*. www.macmillansolutions.com
- Martínez, A., & Rodríguez, P. (2017). Interacciones entre Fertilizantes Químicos y Hongos Micorrízicos en Cultivos de Café. *Agroforestería de Las Américas*, 45(2), 78–92.

- Moreno, C., González, M., & Egido, J. (2015). Influencia Del Manejo Sobre La Calidad Del Suelo. *ECUADOR ES CALIDAD: Revista Científica Ecuatoriana*, 2(1). <https://doi.org/10.36331/revista.v2i1.8>
- Morocho, F., & Chilllogallo, J. (2010). EFECTO DE DIFERENTES GRANULOMETRÍAS DE CARBÓN VEGETAL EN LA AIREACIÓN DE UN SUELO FRANCO, EN EL CULTIVO DE TOMATE DE MESA (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO INVERNADERO EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL "LA ARGELIA", FASE II. *UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA*, 2005, 1–12.
- Moya, F., & Farinango, A. (2010). *EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS EN SUELOS AGRÍCOLAS MEDIANTE ABONOS ORGÁNICOS EN CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN SANTA MARTHA DE CUBA, CARCHI.*
- Muleta, D., Assefa, F., Nemomissa, S., & Granhall, U. (2008). Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi spores in soils of smallholder agroforestry and monocultural coffee systems in southwestern Ethiopia. *Biology and Fertility of Soils*, 44(4), 653–659. <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0261-3>
- Nieto, W. (2019). *Uso del biocarbón para reducir la compactación de un suelo sobrepastoreado usando como indicador el rendimiento del Zea mays variedad INIA 616.* Universidad Nacional Intercultural de la Amazonia .
- Novillo, I. D., Carrillo, M. D., Cargua, J. E., Nabel, V., Albán, K. E. & Lourdes, F. I. (2018). Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas. *Temas Agrarios*, 23(2), 177–187.
- Núñez, N. (2022). *EVALUACIÓN DE TRES TIPOS DE FERTILIZANTE EN CAFÉ (*Coffea arabica*), EN UN SISTEMA AGROFORESTAL, PURANQUÍ, INTAG, IMBABURA.* <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/12232/2/03%20FOR%20324%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- Obaco, J. (2023). *Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y hongos Micorrízicos sobre la evolución de la macro porosidad del suelo y el crecimiento de cafeto (*Coffea-Arabica* L) en la Argelia, provincia de Loja* [Universidad Nacional de Loja]. Tesis. Borrador.
- Ocampo, J. A., & Méndez, J. (2012). Micorrizas Arbusculares en Sistemas Agroforestales: Aspectos Ecológicos y Aplicaciones. *Revista de Ciencias Agropecuarias*, 29(1), 50–68.

- Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mäder, P., Boller, T., & Wiemken, A. (2003). Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of Central Europe. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(5), 2816–2824. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.5.2816-2824.2003>
- O'Geen, A. (2013). *Soil Water Dynamics*. Nature Education Knowledge.
- Pachés, M. A. (2019). El agua en el suelo: fuerzas de retención. *Universidad Politécnica de Valencia*, 31(3), 1–10.
- Pérez, A., Rojas, J., & Montes, D. (2011). Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el caribe colombiano. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 3(2), 366. <https://doi.org/10.24188/recia.v3.n2.2011.412>
- Picoita, D. (2021). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO EN EL CULTIVO DE CAFÉ (Coffea arábica L.) EN EL CENTRO BINACIONAL DE FORMACIÓN TÉCNICA ZAPOTEPAMBA - PALTAS* [Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/24377/1/Danny%20Armando%20Picoita%20Guerrero.pdf>
- Poma, G., & Robles, R. (2023). *Efecto de las micorrizas en el cultivo del cafeto (Coffea arabica var. Caturra), en etapa de vivero en Chanchamayo - Junín* [UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN]. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/3264/1/T026_04340721_T.pdf
- Prado, M. (2004). *MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO MEDIANTE APLICACIÓN DE BOCASHI, PARA CULTIVAR PIMIENTO HÍBRIDO QUETZAL, CANTÓN PUYANGO*. Universidad Nacional de Loja.
- Prefectura de Loja. (2015). *Planta de Bioinsumos con resultados de calidad - GPL*. <https://prefectura Loja.gob.ec/planta-de-bioinsumos-con-resultados-de-calidad/>
- Quiroga, A., & Bono, A. (2012). *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*.
- Ricárdez- Pérez, J., Álvarez-Solís, J., Pat- Fernández, J., Jarquín-Sánchez, A., & Ramos-Reyes, R. (2020). Vermicomposta y micorriza arbuscular, su efecto en la nutrición del cacao en fase de invernadero. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(3), 1–12. <https://doi.org/10.19136/era.a7n3.2282>

- Rodríguez, J. (2001). *Efecto del biofertilizante Mycoral® (micorriza arbuscular) en el desarrollo del café (Coffea arabica L.) en vivero en Zamorano, Honduras*. [ZAMORANO]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/ee2acc94-0892-4ad9-a8be-1a45579bd83d/content>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades Físicas del Suelo. *Transactions of the Faraday Society*, 64, 3358–3360. <https://doi.org/10.1039/TF9686403358>
- Sánchez, J., & Fernández, M. (2015). Efectos de la Inoculación con Hongos Micorrízicos en Cultivos de Café. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 39(4), 1151–1163.
- Sánchez, T. (2017). *EFFECTO DE INÓCULOS DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN PLANTAS CLONALES DE CAFÉ (Coffea arabica L.) VARIEDAD CATURRA EN CONDICIONES DE INVERNADERO, RODRÍGUEZ DE MENDOZA, REGIÓN AMAZONAS*. 125.
- Sarango, C. (2023). *Efecto de dos tipos de fertilización orgánica y dos niveles de fertilización química en el crecimiento y productividad del cultivo de maíz (Zea mays L.) variedad Tusilla, en el cantón Zamora, provincia de Zamora Chinchipe [Universidad Nacional de Loja]*. https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/27106/1/ClaraElizabeth_SarangoJap%c3%b3n.pdf
- Schüßler, A., & Walker, C. (2010). *The Glomeromycota: a species list with new families and new genera* (2011 CreateSpace Independent Publishing Platform, Ed.). The Royal Botanic Garden Edinburgh, The Royal Botanic Garden Kew, Botanische Staatssammlung Munich and Oregon State University. <https://www.researchgate.net/publication/285775809>
- Shaxson, F., & Barber, R. (2008). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal -El significado de la porosidad del suelo. *Boletín de Suelos de La FAO*, 79, 1–128. <http://www.fao.org>
- Smith, S., & Read, D. (2008). Mycorrhizal Symbiosis (Third Edition). In *Soil Science Society of America Journal* (Issue 2). Wiley.
- Stürmer, S., Stürmer, R., & Pasqualini, D. (2013). Taxonomic diversity and community structure of arbuscular mycorrhizal fungi (Phylum Glomeromycota) in three maritime sand dunes in Santa Catarina state, south Brazil. *Fungal Ecology*, 6(1), 27–36. <https://doi.org/10.1016/J.FUNECO.2012.10.001>

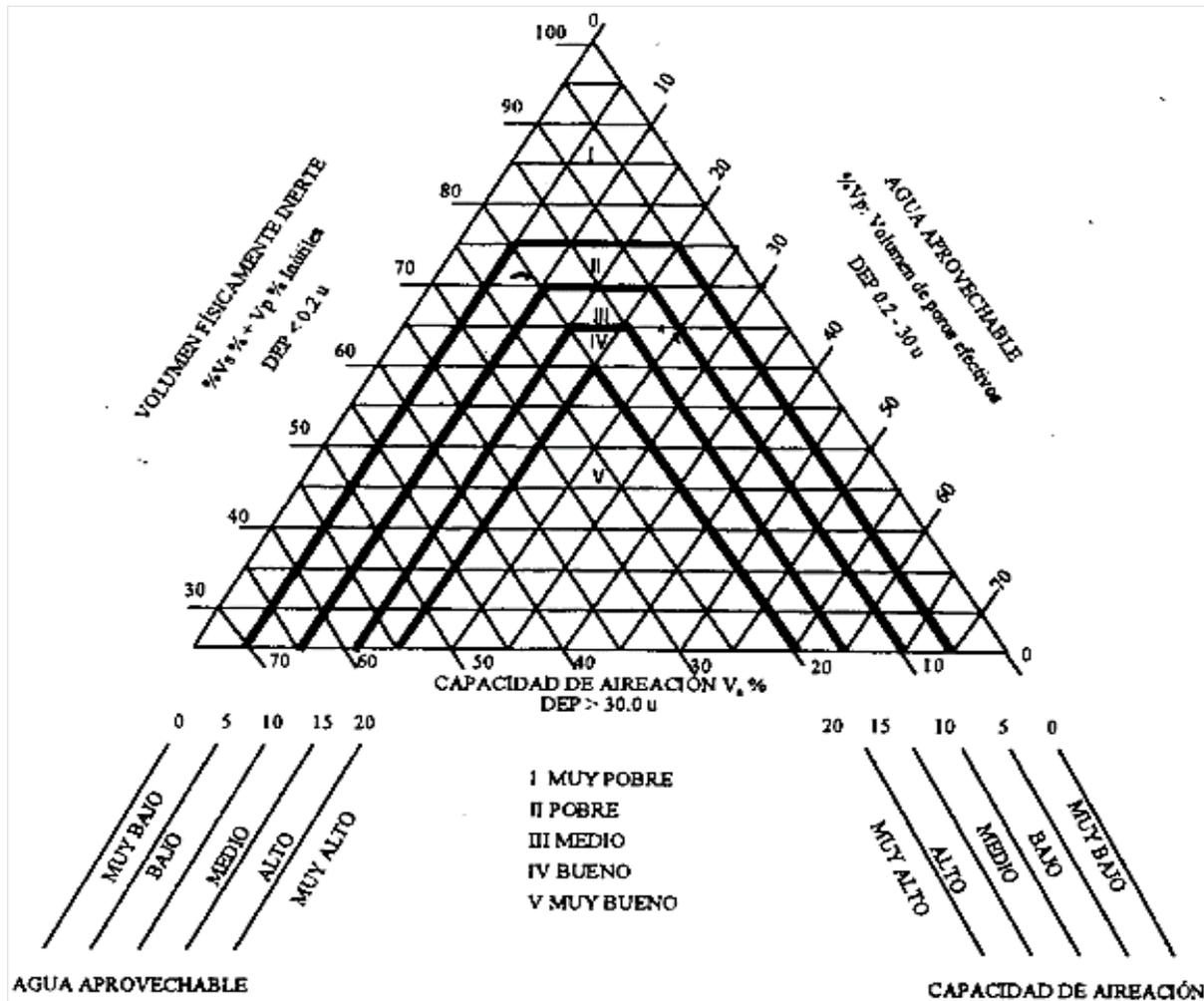
- Sylvia, D., Fuhrmann, J., Hartel, P., & Zuberer, D. (2005). *Principles and Applications of Soil Microbiology*. <https://www.researchgate.net/publication/265885976>
- Tamara, L. A., & Ducuara, J. (2016). *Informe - CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE - fisiología vegetal*. 1–8.
- Tandazo, K. (2019). *EVALUACIÓN QUÍMICA Y BIOLÓGICA DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ DE LOS SECTORES CHAGUARPAMBA Y LOZUMBE* [Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22567/1/Karina%20Fabiola%20Tandazo%20Tandazo.pdf>
- Tesouro, O., Fernández de Ullivari, E., Venturelli, L., Roba, M., Romito, A., & Neiman, O. (2017). *Cultivo de caña en Famallá: Estudio de caso. Indicadores de la fertilidad física y de la vulnerabilidad del suelo: Curvas de retención hídrica y distribución del tamaño de los poros*.
- Trejo, D., Ferrera, R., San Gabriel, W., & Baeza, Y. (2018). Efecto de la micorriza arbuscular en plantas de café (*Coffea arabica* L.) infectadas por el nematodo de la corchosis de la raíz. *Agroproductividad*, 11(4), 98–104.
- Trejo, D., Ferrera-Cerrato, R., García, R., Varela, L., Lara, L., & Alarcón, A. (2011). Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(1), 23–31. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000100002>
- Urrutia, M., Delucis, M., Altamirano, P., & Segarra, H. (2020). *GUIA USO INFOSTAT*. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/59204/mod_resource/content/3/Guia%20infostat%202020.pdf
- Uscumayta, I. (2018). *Efecto del compost en el desarrollo vegetativo de Coffea arabica L. var. Catuai en Mazamari -Perú*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Valarezo, C., Iñiguez, M., Valarezo, L., & Guaya, P. (1998). *Condiciones físicas de los suelos de la región Sur del Ecuador*. http://bibliotecas.esPOCH.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=14819&query_desc=an%3A71551
- Valarezo, L., Valarezo, C., & Mancino, M. (2020). PRODUCCIÓN AGROPECUARIA SOSTENIBLE EN SUELOS ARCILLOSOS DEL PISO TEMPERADO ANDINO DEL SUR DEL ECUADOR. In *Paper Knowledge. Toward a Media History of Documents* (Vol. 7, Issue 2).

- Vallejos-Torres, G., Arévalo, L., Iliquin, I., & Solís, R. (2019). Respuesta en Campo de Clones de Café a la Inoculación con Consorcios de Hongos Micorrízicos Arbusculares en la Región Amazonas, Perú. *Información Tecnológica*, 30(6), 73–84. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600073>
- Vallejos-Torres, G., Sánchez, T., García, M. A., Trigoso, M., & Arévalo, L. A. (2019). Efecto de hongos formadores de micorrizas arbusculares en clones de café (*Coffea arabica*) variedad Caturra. *Acta Agronómica*, 68(4), 278–284. <https://doi.org/10.15446/acag.v68n4.72117>
- Vanegas, F. (2016). *El Suelo Óptimo para el cultivo de café*. <https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/08/31/el-suelo-optimo-para-el-cultivo-de-cafe/>
- Vargas, K. (2020). *RESPUESTA AGRONÓMICA DE TRES VARIEDADES DE CAFÉ (Coffea arabica) CON TRES NIVELES DE FERTILIZACIÓN FOLIAR*. <https://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6921/1/UTC-PIM-000263.pdf>
- Velásquez, R. (2019). *Guía de variedades de café*. <https://www.anacafe.org/uploads/file/9a4f9434577a433aad6c123d321e25f9/Gu%C3%ADa-de-variedades-Anacaf%C3%A9.pdf>
- Vélez, H. (2021). *Determinación de las curvas de retención de humedad de un suelo mediante diferentes metodologías para su aplicación en el manejo del riego [UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA]*. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/177694/Velez%20-%20Determinacion%20de%20las%20curvas%20de%20retencion%20de%20humedad%20de%20un%20suelo%20mediante%20diferentes%20metod....pdf?sequence=4>
- Venegas, S., Orellana, D., & Pérez, P. (2018). La realidad Ecuatoriana en la producción de café. *RECIMUNDO*, 72–91. [https://doi.org/10.26820/recimundo/2.\(2\).2018.72-91](https://doi.org/10.26820/recimundo/2.(2).2018.72-91)
- Vera, M. G. (2020). *Clases texturales de los suelos y su relación con la compactación en sistemas de cultivos de maíz (Zea mays L.) en el Ecuador*. 1–28.
- Villamagua, M., Loaiza, E., & Naula, P. (2008, April). Efecto del carbón vegetal en las propiedades físicas-químicas del suelo en cultivo de tomate de mesa *Solanum Lycopersicum L.* bajo invernadero. *Revista Científica. Volumen 8*, 85–100. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/362/1/EFECTO%20DEL%20CARBON.pdf>

- Villamagua, M., Valarezo, L., Valarezo, C., Tandazo, C., & Ramón, M. (2013). Efecto de granulometrías de biocarbon sobre las condiciones físicas del suelo y tensiones de humedad en el cultivo del tomate *Solanumlycopersicum*, bajo invernadero. *Revista CEDAMAZ*. Vol. 3, No. 1, 93–105.
- Weil, R., & Brady, N. (2017). *The nature and properties of soils*. 15th edition. Pearson.
- Zambrano, P. (2019). *EVALUACIÓN QUÍMICA Y BIOLÓGICA DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ DE LOS SECTORES CONSAPAMBA Y PUEBLO NUEVO DE LOS CANTONES ESPÍNDOLA Y LOJA* [Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22576/1/PAOLA%20LOURDES%20ZAMBRANO%20SARANGO.pdf>
- Zanor, G., López, M., Martínez-Yáñez, R., Ramírez-Santoyo, L., Gutiérrez-Vargas, S., & León-Galván, M. (2018). Mejoramiento de las propiedades físicas y químicas de un suelo agrícola mezclado con lombricompostas de dos efluentes de biodigestor. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 19(4), 1–10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.036>

11. Anexos

Anexo 1. Diagrama triangular para evaluar la condición física de los suelos para el crecimiento de las plantas.



Fuente: Tomado de ILACO (1981), citado por C. Valarezo et al. (1998).

Anexo 2. Dosis aplicadas por tratamiento de Abono orgánico (AO) (kg de Nutrisano).

Tratamientos	Bloque 1 Kg/planta	Bloque 2 kg/planta	Bloque 3 kg/planta
AO 0% + HMA 0 cápsulas			
AO 0% + HMA 10 cápsulas			
AO 0% + HMA 20 cápsulas			
AO 0% + HMA 30 cápsulas			
AO 6% + HMA 0 cápsulas	2,14	1,88	1,64
AO 6% + HMA 10 cápsulas	2,14	1,88	1,64
AO 6% + HMA 20 cápsulas	2,14	1,88	1,64
AO 6% + HMA 30 cápsulas	2,14	1,88	1,64
AO 8% + HMA 0 cápsulas	3,87	3,52	3,10
AO 8% + HMA 10 cápsulas	3,87	3,52	3,10
AO 8% + HMA 20 cápsulas	3,87	3,52	3,10
AO 8% + HMA 30 cápsulas	3,87	3,52	3,10
AO 10% + HMA 0 cápsulas	5,59	5,15	4,56
AO 10% + HMA 10 cápsulas	5,59	5,15	4,56
AO 10% + HMA 20 cápsulas	5,59	5,15	4,56
AO 10% + HMA 30 cápsulas	5,59	5,15	4,56

Anexo 3. Análisis de varianza de la densidad aparente del suelo (g cm^{-3}) y prueba Tukey (0-180 días).

Análisis de la varianza

Da 0 días

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Da 0 días	48	0.37	0.01	7.57

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.16	17	0.01	1.01	0.4710
AO%	0.01	3	4.1E-03	0.45	0.7207
HMA cápsulas	0.02	3	0.01	0.88	0.4632
Bloque	0.03	2	0.02	1.65	0.2098
AO%*HMA cápsulas	0.09	9	0.01	1.11	0.3869
Error	0.27	30	0.01		
Total	0.43	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.10612

Error: 0.0091 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.	
8	1.24	12	0.03	A
0	1.25	12	0.03	A
10	1.28	12	0.03	A
6	1.28	12	0.03	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.10612

Error: 0.0091 gl: 30

HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
20	1.24	12	0.03	A
30	1.24	12	0.03	A
0	1.28	12	0.03	A
10	1.29	12	0.03	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.29095

Error: 0.0091 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
8	30	1.12	3	0.06	A
0	0	1.22	3	0.06	A
8	20	1.23	3	0.06	A
0	20	1.23	3	0.06	A
10	20	1.24	3	0.06	A
6	10	1.25	3	0.06	A
0	30	1.25	3	0.06	A
6	20	1.25	3	0.06	A
10	0	1.26	3	0.06	A
10	10	1.29	3	0.06	A
6	30	1.30	3	0.06	A
0	10	1.30	3	0.06	A
8	10	1.31	3	0.06	A
10	30	1.31	3	0.06	A
8	0	1.32	3	0.06	A
6	0	1.32	3	0.06	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Da 180 días

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Da 180 días	48	0.66	0.46	7.12

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.35	17	0.02	3.37	0.0018
AO%	0.23	3	0.08	12.75	<0.0001
HMA cápsulas	0.02	3	0.01	1.16	0.3413
Bloque	0.01	2	2.5E-03	0.42	0.6620
AO%*HMA cápsulas	0.09	9	0.01	1.63	0.1515
Error	0.18	30	0.01		
Total	0.53	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.08629

Error: 0.0060 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.	
10	1.00	12	0.02	A
8	1.06	12	0.02	A B
6	1.12	12	0.02	B C
0	1.19	12	0.02	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.08629

Error: 0.0060 gl: 30

HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
30	1.07	12	0.02	A
20	1.08	12	0.02	A
10	1.11	12	0.02	A
0	1.12	12	0.02	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.23657

Error: 0.0060 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
8	30	0.95	3	0.04	A
10	20	0.95	3	0.04	A
10	0	1.00	3	0.04	A B
10	30	1.00	3	0.04	A B C
10	10	1.06	3	0.04	A B C
8	10	1.06	3	0.04	A B C
8	20	1.06	3	0.04	A B C
6	10	1.09	3	0.04	A B C
6	20	1.10	3	0.04	A B C
6	30	1.12	3	0.04	A B C
0	0	1.14	3	0.04	A B C
8	0	1.16	3	0.04	A B C
6	0	1.17	3	0.04	A B C
0	20	1.19	3	0.04	B C
0	30	1.19	3	0.04	B C
0	10	1.23	3	0.04	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Anexo 4. Análisis de varianza de la porosidad total del suelo (%) y prueba Tukey (0-180 días).

Análisis de la varianza

Porosidad 0 días

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Porosidad 0 días	48	0.23	0.00	12.01

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	228.12	17	13.42	0.54	0.9079
AO%	26.76	3	8.92	0.36	0.7825
HMA cápsulas	37.15	3	12.38	0.50	0.6857
Bloque	5.48	2	2.74	0.11	0.8958
AO%*HMA cápsulas	158.73	9	17.64	0.71	0.6945
Error	744.21	30	24.81		
Total	972.33	47			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=5.52888

Error: 24.8069 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.
8	42.76	12	1.44 A
0	41.20	12	1.44 A
10	41.00	12	1.44 A
6	40.94	12	1.44 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.34116

Error: 24.8069 gl: 30

Bloque	Medias	n	E.E.
2	41.80	16	1.25 A
3	41.62	16	1.25 A
1	41.01	16	1.25 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=15.15790

Error: 24.8069 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.
8	0	45.43	3	2.88 A
6	20	44.41	3	2.88 A
0	0	43.48	3	2.88 A
8	10	43.40	3	2.88 A
10	20	42.26	3	2.88 A
0	30	42.05	3	2.88 A
6	30	41.81	3	2.88 A
0	10	41.40	3	2.88 A
10	0	41.39	3	2.88 A
8	20	41.22	3	2.88 A
6	0	41.02	3	2.88 A
8	30	40.98	3	2.88 A
10	30	40.20	3	2.88 A
10	10	40.15	3	2.88 A
0	20	37.88	3	2.88 A
6	10	36.54	3	2.88 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

PorosidadT 180 días

Variable	N	R ²	R ² A _j	CV
PorosidadT 180 días	48	0.84	0.74	7.84

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2810.42	17	165.32	9.07	<0.0001
AO%	2097.09	3	699.03	38.34	<0.0001
HMA cápsulas	221.51	3	73.84	4.05	0.0157
Bloque	135.35	2	67.68	3.71	0.0363
AO%*HMA cápsulas	356.47	9	39.61	2.17	0.0538
Error	546.97	30	18.23		
Total	3357.39	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=4.73994

Error: 18.2324 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.	
10	62.03	12	1.23	A
8	59.33	12	1.23	A
6	51.32	12	1.23	B
0	45.31	12	1.23	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.72170

Error: 18.2324 gl: 30

Bloque	Medias	n	E.E.	
1	56.87	16	1.07	A
2	53.37	16	1.07	A
3	53.25	16	1.07	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=12.99497

Error: 18.2324 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.						
10	20	65.98	3	2.47	A					
8	30	64.69	3	2.47	A					
10	30	62.11	3	2.47	A	B				
10	0	61.98	3	2.47	A	B	C			
6	20	59.55	3	2.47	A	B	C	D		
8	20	59.52	3	2.47	A	B	C	D		
8	10	58.52	3	2.47	A	B	C	D		
10	10	58.06	3	2.47	A	B	C	D	E	
8	0	54.60	3	2.47	A	B	C	D	E	F
6	30	50.00	3	2.47		B	C	D	E	F
6	10	49.00	3	2.47			C	D	E	F
0	0	48.15	3	2.47				D	E	F
6	0	46.74	3	2.47				D	E	F
0	20	45.22	3	2.47					E	F
0	30	44.86	3	2.47						F
0	10	42.99	3	2.47						F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Anexo 5. Análisis de las características físicas e hidrofísicas del suelo y prueba Tukey (180 días).

Análisis de la varianza

SAT

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
SAT	48	0.84	0.74	7.84

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2810.42	17	165.32	9.07	<0.0001
AO%	2097.09	3	699.03	38.34	<0.0001
HMA cápsulas	221.51	3	73.84	4.05	0.0157
Bloque	135.35	2	67.68	3.71	0.0363
AO%*HMA cápsulas	356.47	9	39.61	2.17	0.0538
Error	546.97	30	18.23		
Total	3357.39	47			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.73994

Error: 18.2324 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.	
10	62.03	12	1.23	A
8	59.33	12	1.23	A
6	51.32	12	1.23	B
0	45.31	12	1.23	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.73994

Error: 18.2324 gl: 30

HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
20	57.57	12	1.23	A
30	55.42	12	1.23	A B
0	52.87	12	1.23	A B
10	52.14	12	1.23	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=12.99497

Error: 18.2324 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
10	20	65.98	3	2.47	A
8	30	64.69	3	2.47	A
10	30	62.11	3	2.47	A B
10	0	61.98	3	2.47	A B C
6	20	59.55	3	2.47	A B C D
8	20	59.52	3	2.47	A B C D
8	10	58.52	3	2.47	A B C D
10	10	58.06	3	2.47	A B C D E
8	0	54.60	3	2.47	A B C D E F
6	30	50.00	3	2.47	B C D E F
6	10	49.00	3	2.47	C D E F
0	0	48.15	3	2.47	D E F
6	0	46.74	3	2.47	D E F
0	20	45.22	3	2.47	E F
0	30	44.86	3	2.47	F
0	10	42.99	3	2.47	F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

CC

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CC	48	0.52	0.24	10.37

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	215.80	17	12.69	1.88	0.0642
AO%	61.55	3	20.52	3.03	0.0445
HMA cápsulas	3.15	3	1.05	0.15	0.9257
Bloque	101.31	2	50.65	7.49	0.0023
AO%*HMA cápsulas	49.79	9	5.53	0.82	0.6044
Error	202.96	30	6.77		
Total	418.76	47			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=2.88732

Error: 6.7653 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.	
10	27.04	12	0.75	A
0	24.63	12	0.75	A
8	24.37	12	0.75	A
6	24.32	12	0.75	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=2.88732**

Error: 6.7653 gl: 30

HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
20	25.36	12	0.75	A
10	25.17	12	0.75	A
30	25.15	12	0.75	A
0	24.67	12	0.75	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=7.91585**

Error: 6.7653 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
10	20	28.96	3	1.50	A
10	30	27.96	3	1.50	A
10	10	25.67	3	1.50	A
10	0	25.56	3	1.50	A
8	10	25.56	3	1.50	A
6	10	25.49	3	1.50	A
0	0	25.44	3	1.50	A
8	0	25.00	3	1.50	A
6	30	24.73	3	1.50	A
0	30	24.73	3	1.50	A
0	20	24.41	3	1.50	A
6	20	24.36	3	1.50	A
0	10	23.96	3	1.50	A
8	20	23.72	3	1.50	A
8	30	23.18	3	1.50	A
6	0	22.67	3	1.50	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

PMP

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PMP	48	0.52	0.24	10.37

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	63.76	17	3.75	1.87	0.0645
AO%	18.17	3	6.06	3.03	0.0448
HMA cápsulas	0.94	3	0.31	0.16	0.9247
Bloque	29.92	2	14.96	7.47	0.0023
AO%*HMA cápsulas	14.73	9	1.64	0.82	0.6045
Error	60.03	30	2.00		
Total	123.79	47			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=1.57032

Error: 2.0011 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.
10	14.70	12	0.41 A
0	13.39	12	0.41 A
8	13.24	12	0.41 A
6	13.22	12	0.41 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=1.57032

Error: 2.0011 gl: 30

HMA cápsulas	Medias	n	E.E.
20	13.79	12	0.41 A
10	13.68	12	0.41 A
30	13.67	12	0.41 A
0	13.41	12	0.41 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.30517

Error: 2.0011 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.
10	20	15.74	3	0.82 A
10	30	15.19	3	0.82 A
10	10	13.95	3	0.82 A
10	0	13.89	3	0.82 A
8	10	13.89	3	0.82 A
6	10	13.85	3	0.82 A
0	0	13.83	3	0.82 A
8	0	13.59	3	0.82 A
6	30	13.44	3	0.82 A
0	30	13.44	3	0.82 A
0	20	13.27	3	0.82 A
6	20	13.24	3	0.82 A
0	10	13.02	3	0.82 A
8	20	12.89	3	0.82 A
8	30	12.60	3	0.82 A
6	0	12.32	3	0.82 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

AA

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
AA	48	0.52	0.24	10.36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	44.96	17	2.64	1.88	0.0637
AO%	12.84	3	4.28	3.04	0.0442
HMA cápsulas	0.65	3	0.22	0.15	0.9268
Bloque	21.12	2	10.56	7.50	0.0023
AO%*HMA cápsulas	10.36	9	1.15	0.82	0.6043
Error	42.23	30	1.41		
Total	87.19	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.31701

Error: 1.4076 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.
10	12.34	12	0.34 A
0	11.24	12	0.34 A
8	11.12	12	0.34 A
6	11.10	12	0.34 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.31701

Error: 1.4076 gl: 30

HMA cápsulas	Medias	n	E.E.
20	11.58	12	0.34 A
10	11.49	12	0.34 A
30	11.48	12	0.34 A
0	11.26	12	0.34 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.61071

Error: 1.4076 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.
10	20	13.22	3	0.68 A
10	30	12.76	3	0.68 A
10	10	11.72	3	0.68 A
10	0	11.67	3	0.68 A
8	10	11.67	3	0.68 A
6	10	11.64	3	0.68 A
0	0	11.61	3	0.68 A
8	0	11.41	3	0.68 A
6	30	11.29	3	0.68 A
0	30	11.29	3	0.68 A
0	20	11.14	3	0.68 A
6	20	11.12	3	0.68 A
0	10	10.94	3	0.68 A
8	20	10.83	3	0.68 A
8	30	10.58	3	0.68 A
6	0	10.35	3	0.68 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

CA

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CA	48	0.80	0.69	14.88

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2296.71	17	135.10	7.06	<0.0001
AO%	1730.47	3	576.82	30.13	<0.0001
HMA cápsulas	191.15	3	63.72	3.33	0.0327
Bloque	2.70	2	1.35	0.07	0.9320
AO%*HMA cápsulas	372.38	9	41.38	2.16	0.0550
Error	574.41	30	19.15		
Total	2871.12	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=4.85735

Error: 19.1468 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.	
10	35.00	12	1.26	A
8	34.97	12	1.26	A
6	27.01	12	1.26	B
0	20.67	12	1.26	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=4.85735

Error: 19.1468 gl: 30

HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
20	32.20	12	1.26	A
30	30.27	12	1.26	A B
0	28.20	12	1.26	A B
10	26.97	12	1.26	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=13.31686

Error: 19.1468 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
8	30	41.51	3	2.53	A
10	20	37.01	3	2.53	A B
10	0	36.42	3	2.53	A B C
8	20	35.79	3	2.53	A B C D
6	20	35.18	3	2.53	A B C D
10	30	34.16	3	2.53	A B C D
8	10	32.97	3	2.53	A B C D E
10	10	32.39	3	2.53	A B C D E
8	0	29.60	3	2.53	A B C D E F
6	30	25.27	3	2.53	B C D E F
6	0	24.06	3	2.53	B C D E F
6	10	23.51	3	2.53	C D E F
0	0	22.71	3	2.53	D E F
0	20	20.81	3	2.53	E F
0	30	20.14	3	2.53	E F
0	10	19.03	3	2.53	F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

VFI

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
VPPFI	48	0.83	0.73	6.98

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2477.74	17	145.75	8.55	<0.0001
AO%	1882.84	3	627.61	36.82	<0.0001
HMA cápsulas	204.09	3	68.03	3.99	0.0167
Bloque	38.13	2	19.07	1.12	0.3401
AO%*HMA cápsulas	352.68	9	39.19	2.30	0.0423
Error	511.43	30	17.05		
Total	2989.17	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=4.58336

Error: 17.0477 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.	
10	52.66	12	1.19	A
8	53.91	12	1.19	A
6	61.90	12	1.19	B
0	68.08	12	1.19	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=4.58336

Error: 17.0477 gl: 30

HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
20	56.22	12	1.19	A
30	58.25	12	1.19	A B
0	60.54	12	1.19	A B
10	61.54	12	1.19	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=12.56570

Error: 17.0477 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
8	30	47.91	3	2.38	A
10	20	49.77	3	2.38	A
10	0	51.91	3	2.38	A B
10	30	53.08	3	2.38	A B C
8	20	53.38	3	2.38	A B C D
6	20	53.70	3	2.38	A B C D
8	10	55.37	3	2.38	A B C D
10	10	55.89	3	2.38	A B C D E
8	0	58.99	3	2.38	A B C D E F
6	30	63.44	3	2.38	B C D E F
6	10	64.86	3	2.38	C D E F
6	0	65.58	3	2.38	C D E F
0	0	65.67	3	2.38	D E F
0	20	68.05	3	2.38	E F
0	30	68.58	3	2.38	F
0	10	70.04	3	2.38	F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Anexo 6. Análisis de varianza de la altura de planta (cm) y prueba Tukey (0-210 días).

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² A ₁	CV
Incremento (cm)	48	0.61	0.39	11.50

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	252.68	17	14.86	2.78	0.0070
AO%	78.32	3	26.11	4.88	0.0070
HMA Cápsulas	0.30	3	0.10	0.02	0.9964
Bloque	173.20	2	86.60	16.19	<0.0001
AO%*HMA Cápsulas	0.86	9	0.10	0.02	>0.9999
Error	160.50	30	5.35		
Total	413.18	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.56758

Error: 5.3499 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.	
10	21.44	12	0.67	A
8	20.85	12	0.67	A
6	20.13	12	0.67	A B
0	18.06	12	0.67	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.56758

Error: 5.3499 gl: 30

HMA Cápsulas	Medias	n	E.E.	
30	20.19	12	0.67	A
20	20.19	12	0.67	A
10	20.10	12	0.67	A
0	20.00	12	0.67	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=7.03925

Error: 5.3499 gl: 30

AO%	HMA Cápsulas	Medias	n	E.E.	
10	30	21.55	3	1.34	A
10	10	21.52	3	1.34	A
10	20	21.42	3	1.34	A
10	0	21.28	3	1.34	A
8	30	21.09	3	1.34	A
8	20	21.09	3	1.34	A
8	0	20.64	3	1.34	A
8	10	20.58	3	1.34	A
6	0	20.24	3	1.34	A
6	10	20.16	3	1.34	A
6	30	20.08	3	1.34	A
6	20	20.05	3	1.34	A
0	20	18.21	3	1.34	A
0	10	18.16	3	1.34	A
0	30	18.05	3	1.34	A
0	0	17.82	3	1.34	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Anexo 7. Análisis de varianza del diámetro de tallo (mm) y prueba Tukey (0-210 días).

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² A _j	CV
Incremento (mm)	48	0.55	0.29	14.83

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	11.43	17	0.67	2.15	0.0325
AO%	7.66	3	2.55	8.16	0.0004
HMA cápsulas	0.20	3	0.07	0.21	0.8868
Bloque	3.24	2	1.62	5.18	0.0117
AO%*HMA cápsulas	0.33	9	0.04	0.12	0.9989
Error	9.38	30	0.31		
Total	20.81	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.62077

Error: 0.3127 gl: 30

AO% Medias n E.E.

10	4.27	12	0.16	A
8	3.98	12	0.16	A B
6	3.64	12	0.16	B C
0	3.20	12	0.16	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.62077

Error: 0.3127 gl: 30

HMA cápsulas Medias n E.E.

30	3.85	12	0.16	A
20	3.79	12	0.16	A
10	3.77	12	0.16	A
0	3.67	12	0.16	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.70189

Error: 0.3127 gl: 30

AO% HMA cápsulas Medias n E.E.

10	30	4.38	3	0.32	A
10	0	4.25	3	0.32	A
10	20	4.22	3	0.32	A
10	10	4.20	3	0.32	A
8	30	4.13	3	0.32	A
8	10	3.96	3	0.32	A
8	20	3.92	3	0.32	A
8	0	3.91	3	0.32	A
6	20	3.87	3	0.32	A
6	10	3.64	3	0.32	A
6	30	3.61	3	0.32	A
6	0	3.43	3	0.32	A
0	30	3.28	3	0.32	A
0	10	3.26	3	0.32	A
0	20	3.13	3	0.32	A
0	0	3.10	3	0.32	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Anexo 8. Análisis de varianza del número de ramas (0-210 días).

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² A1	CV
Incremento (# ramas)	48	0.42	0.09	23.72

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	22.58	17	1.33	1.28	0.2683
AO%	0.85	3	0.28	0.27	0.8442
HMA cápsulas	2.17	3	0.72	0.70	0.5606
Bloque	14.07	2	7.03	6.79	0.0037
AO%*HMA cápsulas	5.50	9	0.61	0.59	0.7951
Error	31.09	30	1.04		
Total	53.67	47			

Medias ajustadas, error estándar y número de observaciones

Error: 1.0362 gl: 30

AO% Medias n E.E.

10	4.44	12	0.29
8	4.40	12	0.29
0	4.19	12	0.29
6	4.13	12	0.29

Medias ajustadas, error estándar y número de observaciones

Error: 1.0362 gl: 30

HMA cápsulas Medias n E.E.

10	4.60	12	0.29
30	4.38	12	0.29
20	4.14	12	0.29
0	4.06	12	0.29

Medias ajustadas, error estándar y número de observaciones

Error: 1.0362 gl: 30

AO% HMA cápsulas Medias n E.E.

6	10	4.93	3	0.59
8	30	4.90	3	0.59
0	10	4.76	3	0.59
10	20	4.71	3	0.59
8	0	4.64	3	0.59
10	10	4.56	3	0.59
0	30	4.50	3	0.59
10	30	4.41	3	0.59
8	10	4.14	3	0.59
10	0	4.10	3	0.59
6	20	4.00	3	0.59
8	20	3.92	3	0.59
0	20	3.91	3	0.59
6	0	3.88	3	0.59
6	30	3.70	3	0.59
0	0	3.61	3	0.59

Anexo 9. Análisis de varianza del número de nudos y prueba Tukey (0-210 días).

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² A _j	CV
Incremento (# nudos)	48	0.49	0.20	14.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	12.05	17	0.71	1.70	0.0999
AO%	4.72	3	1.57	3.77	0.0208
HMA cápsulas	0.33	3	0.11	0.26	0.8528
Bloque	6.63	2	3.32	7.94	0.0017
AO%*HMA cápsulas	0.37	9	0.04	0.10	0.9995
Error	12.53	30	0.42		
Total	24.58	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.71735

Error: 0.4176 gl: 30

AO% Medias n E.E.

10	5.12	12	0.19	A
8	4.62	12	0.19	A B
6	4.40	12	0.19	B
0	4.32	12	0.19	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.71735

Error: 0.4176 gl: 30

HMA cápsulas Medias n E.E.

30	4.74	12	0.19	A
10	4.62	12	0.19	A
20	4.59	12	0.19	A
0	4.51	12	0.19	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.96667

Error: 0.4176 gl: 30

AO% HMA cápsulas Medias n E.E.

10	30	5.23	3	0.37	A
10	10	5.15	3	0.37	A
10	20	5.08	3	0.37	A
10	0	5.03	3	0.37	A
8	30	4.97	3	0.37	A
8	10	4.58	3	0.37	A
8	20	4.49	3	0.37	A
8	0	4.45	3	0.37	A
6	20	4.42	3	0.37	A
6	0	4.41	3	0.37	A
6	30	4.40	3	0.37	A
6	10	4.39	3	0.37	A
0	10	4.38	3	0.37	A
0	20	4.38	3	0.37	A
0	30	4.35	3	0.37	A
0	0	4.16	3	0.37	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Anexo 10. Análisis de varianza del número de hojas y prueba Tukey (0-210 días).

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² A _j	CV
Incremento (# hojas)	48	0.49	0.20	14.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	48.05	17	2.83	1.69	0.1012
AO%	18.86	3	6.29	3.76	0.0209
HMA cápsulas	1.31	3	0.44	0.26	0.8524
Bloque	26.41	2	13.20	7.91	0.0017
AO%*HMA cápsulas	1.47	9	0.16	0.10	0.9995
Error	50.11	30	1.67		
Total	98.16	47			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.43462

Error: 1.6702 gl: 30

AO%	Medias	n	E.E.	
10	10.24	12	0.37	A
8	9.24	12	0.37	A B
6	8.81	12	0.37	B
0	8.63	12	0.37	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.43462

Error: 1.6702 gl: 30

HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
30	9.48	12	0.37	A
10	9.25	12	0.37	A
20	9.18	12	0.37	A
0	9.02	12	0.37	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.93314

Error: 1.6702 gl: 30

AO%	HMA cápsulas	Medias	n	E.E.	
10	30	10.47	3	0.75	A
10	10	10.30	3	0.75	A
10	20	10.15	3	0.75	A
10	0	10.05	3	0.75	A
8	30	9.94	3	0.75	A
8	10	9.16	3	0.75	A
8	20	8.97	3	0.75	A
8	0	8.89	3	0.75	A
6	20	8.84	3	0.75	A
6	0	8.81	3	0.75	A
6	30	8.80	3	0.75	A
6	10	8.77	3	0.75	A
0	10	8.75	3	0.75	A
0	20	8.75	3	0.75	A
0	30	8.69	3	0.75	A
0	0	8.31	3	0.75	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Anexo 11. Reconocimiento del lugar.



Anexo 12. Limpieza del cultivo.



Anexo 13. Fertilización.



Anexo 14. Tomado de muestras.



Anexo 15. Monitoreo de las propiedades físicas (densidad aparente y saturación).



Anexo 16. Monitoreo de variables de crecimiento de la planta de café.



Anexo 17. Resiembra de café.



Anexo 18. Carta geológica Gonzanamá.



Anexo 19. Poster del proyecto de investigación.



Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y hongos micorrizicos sobre la macro porosidad del suelo y el desarrollo vegetativo del cafeto (*Coffea arabica* L.), en La Argelia, provincia de Loja

Miguel Ángel Villamagua; Ángel Francisco Guayanay
 Institución: Universidad Nacional de Loja
 Autor para correspondencia: miguel.villamagua@unl.edu.ec

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
 "Sistemas de producción agropecuaria para la soberanía alimentaria"

INTRODUCCIÓN

El Ecuador es uno de los pocos países en el mundo que exporta grandes cantidades de café de las variedades arábigo y robusta. Este sector productivo emplea a unos 200 000 ecuatorianos y aporta alrededor del 3 % del PIB (Castro Pincay & Barrenzuela Unda, 2020).

Para el año 2019 el cultivo de café en Ecuador tiene una extensión de 76 785 ha, de las cuales a la provincia de Loja le corresponden 7 457 ha equivalente a 9,1 % del área total y presenta un rendimiento de 0,24 t/ha (Lema, 2019).

Villamagua et al. (2021) mencionan que el bajo rendimiento de café en la provincia de Loja se explica, principalmente, por la baja fertilidad y capacidad de aireación de los suelos (5-8,5 %) producto de la compactación y el bajo contenido de materia orgánica (2 %).

El gran reto de los caficultores es crear nuevas tecnologías a la producción cafetalera, tecnologías diseñadas desde la nutrición vegetal del cultivo del café que involucren enmiendas orgánicas, riego y biofertilizantes, especialmente con la aplicación de microorganismos beneficios, los cuales promueven el crecimiento de las plantas a través de procesos simbióticos.

OBJETIVOS

Objetivo General

Contribuir con información científico-técnica sobre el mejoramiento de la macroporosidad del suelo, por efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y consorcio de hongos micorrizicos arbusculares nativos en el sistema agroforestal de café de la Estación Experimental La Argelia.

Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto de las enmiendas orgánicas y consorcios de HMA nativos sobre las condiciones físicas del suelo para el mejoramiento de la capacidad de aireación y enraizamiento del café.
- Monitorear el desarrollo vegetativo del cultivo de café frente a la aplicación de diferentes dosis de enmiendas orgánicas y consorcios de HMA nativos.

METODOLOGÍA

Ubicación del Ensayo

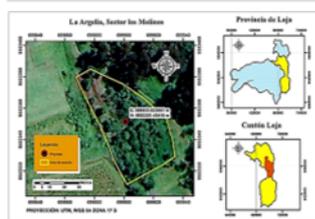


Figura 1. Ubicación geográfica del proyecto de investigación, Estación Experimental La Argelia.
 Coordenadas Planas UTM zona 17 S:
 Norte: 9 553 351 m
 Este: 699 900 m
 Altitud: 2130 m.s.n.m.

Diseño de la Investigación

Bloques al azar bifactorial: abono orgánico y hongos micorrizicos arbusculares; 16 tratamientos, 3 repeticiones.

Tabla 1. Niveles de los factores tratamiento aplicados en el experimento.

Nº Tratamiento	AO	HMA
T1	AO1 (0 %)	HMA1 (0 capulinas)
T2	AO1 (0 %)	HMA2 (10 capulinas)
T3	AO1 (0 %)	HMA3 (20 capulinas)
T4	AO1 (0 %)	HMA4 (30 capulinas)
T5	AO2 (8 %)	HMA1 (0 capulinas)
T6	AO2 (8 %)	HMA2 (10 capulinas)
T7	AO2 (8 %)	HMA3 (20 capulinas)
T8	AO2 (8 %)	HMA4 (30 capulinas)
T9	AO3 (16 %)	HMA1 (0 capulinas)
T10	AO3 (16 %)	HMA2 (10 capulinas)
T11	AO3 (16 %)	HMA3 (20 capulinas)
T12	AO3 (16 %)	HMA4 (30 capulinas)
T13	AO4 (18 %)	HMA1 (0 capulinas)
T14	AO4 (18 %)	HMA2 (10 capulinas)
T15	AO4 (18 %)	HMA3 (20 capulinas)
T16	AO4 (18 %)	HMA4 (30 capulinas)

Propiedades Físicas del Suelo

Densidad aparente, porosidad total y curva de retención de humedad.

Condiciones Físicas del Suelo

Para efectuar este análisis es imprescindible contar con los volúmenes porcentuales de agua aprovechable (AA), capacidad de aireación (CA) y volumen de poros físicamente inertes (VFFI). Finalmente se usó el diagrama triangular de evaluación de las condiciones físicas de los suelos para consumir este estudio.

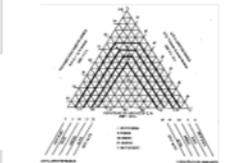


Figura 2. Diagrama triangular para evaluar la condición física de los suelos para el crecimiento de las plantas.

VARIABLES DASOMÉTRICAS

Las evaluaciones para determinar el crecimiento del cultivo de café se efectuaron mensualmente. Variables: altura de la planta (cm), diámetro del tallo (mm) y número de nudos



Figura 3. Monitoreo de variables dasométricas.

RESULTADOS

En los análisis de varianza efectuados para las propiedades físicas de los suelos y las variables dasométricas de la planta de café, se observa que no hay interacción entre los factores de estudio, además, el factor hongos micorrizicos arbusculares no tuvo efecto sobre los resultados. Entonces se procedió a analizar solo el factor abono orgánico.

Evaluación de las Propiedades y Condiciones Físicas del Suelo

Densidad Aparente

Tabla 2. Valores de densidad aparente (g cm⁻³).

Tratamiento	0 días	100 días	180 días	Def. en Tukey a	%
10% de AO	1,25 A	1,05 A	1,15	0,15	16,00
8% de AO	1,24 A	1,06 AB	1,15	0,15	10,95
6% de AO	1,23 A	1,12 BC	1,07	0,07	5,99
Control	1,23 A	1,13 C	1,05	0,00	0,00

Porosidad Total

Tabla 3. Valores de porosidad total (%).

Tratamiento	0 días	100 días	180 días	Def. en Tukey a	%
10% de AO	41,01 A	42,03 A	40,72	0,72	3,30
8% de AO	42,74 A	39,35 A	40,02	0,02	33,34
6% de AO	40,94 A	41,33 B	41,01	0,07	13,28
Control	42,25 A	40,11 C	40,00	0,00	0,00

Curvas de retención de humedad

Tabla 4. Retención de humedad a los 180 días de iniciado el ensayo.

Tratamiento	0 días	100 días	180 días	Def. en Tukey a	AA	ARA
10% de AO	64,56	20,79	18,20	12,44	6,34	1,14
8% de AO	61,87	20,89	18,24	12,28	6,14	1,14
6% de AO	61,87	20,89	18,24	12,28	6,14	1,14
Control	61,87	20,89	18,24	12,28	6,14	1,14

Características Físicas de los Suelos

Tabla 5. AA, CA, VFFI, zona del diagrama triangular e interpretación a los 180 días después de iniciado el ensayo.

Tratamiento	AA	CA	VFFI	Zona	Condición física
10% de AO	41,01	20,79	18,20	1	Óptima
8% de AO	42,74	20,89	18,24	1	Óptima
6% de AO	40,94	20,89	18,24	1	Óptima
Control	42,25	20,89	18,24	1	Óptima

VARIABLES DASOMÉTRICAS

En la Tabla 6 se presentan los valores de las variables monitoreadas del crecimiento de las plantas para los cuatro tratamientos de abono orgánico: altura de planta, diámetro del tallo y número de nudos. Se evidencia incremento con respecto al tratamiento control durante los 210 días de monitoreo: altura de planta 18,74 %, 15,44 % y 11,49 %; diámetro del tallo 33,47 %, 24,61 % y 13,83 %; y, número de nudos 18,76 %, 7,13 % y 2,07 %, con la aplicación 10, 8 y 6 % de abono orgánico.

Tabla 6. Valores de altura de planta, diámetro del tallo y número de nudos con 10, 8 y 6 % de abono orgánico, durante 210 días.

Días	10% de AO			8% de AO			6% de AO			Tukey a
	AN	AP	NT	AN	AP	NT	AN	AP	NT	
0	21,10	12,20	22,27	24,15	2,20	2,70	2,20	2,20	2,20	2,17
60	29,18	22,61	27,21	27,16	2,20	2,15	2,20	2,20	2,20	2,04
60	27,24	22,20	22,20	22,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	0,72
60	29,74	22,20	22,20	22,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	0,72
180	33,10	22,20	22,20	22,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	1,28
180	31,10	22,20	22,20	22,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	1,28
180	31,10	22,20	22,20	22,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	1,28
210	32,10	22,20	22,20	22,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	0,72
210	32,10	22,20	22,20	22,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	0,72

En la Figura 4 (a, b y c), se presenta la regresión lineal para las variables del crecimiento del café registradas. Las tres variables presentaron pendientes positivas muy similares para las aplicaciones 10, 8 y 6 a diferencia del tratamiento control.

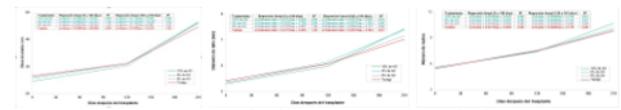


Figura 4a. Altura de planta. Figura 4b. Diámetro del tallo. Figura 4c. Número de nudos.
 Figura 4. Regresión lineal para altura de planta (a), diámetro del tallo (b) y número de nudos (c) con 10, 8, 6 y 0 % de abono orgánico, durante 210 días.

CONCLUSIONES

En cuanto al mejor resultado sobre las propiedades y condiciones físicas de suelo se logró con el tratamiento 10 % de AO. El café desde el establecimiento del cultivo hasta los 210 días mostró que el mejor tratamiento corresponde al 10 % AO, ya que se evidenció mayor incremento en sus variables de crecimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Castro Pincay, C. V., & Barrenzuela Unda, S. (2020). Aspectos sociales y económicos: Caso productores de café en la provincia El oro. Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 3(1), 71-75.
- Lema, V. (2019). Informe de rendimientos objetivos de café (grano oro) 2019. 8.

Anexo 20. Resultados de las características físicas e hidrofísicas.

Bloque	Tratamientos	Propiedades hidrofísicas										
		Profundidad efectiva	SAT	CC	PMP	HE	Da	AA	ARA	CA	LAA	VPFI
		cm	%	%	%	%	g/cm ³	%	%	%	mm	%
1	T1(AO 0% + HMA 0 encapsulados)	25,00	53,60	27,45	14,92	28,70	1,08	12,53	6,27	26,15	313,3	61,32
	T2(AO 0% + HMA 10 encapsulados)	25,00	39,21	26,66	14,49	27,79	1,32	12,17	6,09	12,55	304,3	75,28
	T3(AO 0% + HMA 20 encapsulados)	25,00	49,52	25,28	13,74	26,20	1,15	11,54	5,77	24,24	288,5	64,22
	T4(AO 0% + HMA 30 encapsulados)	25,00	48,34	25,42	13,82	26,36	1,15	11,60	5,80	22,92	290,0	65,48
	T5(AO 6% + HMA 0 encapsulados)	25,00	48,48	25,97	14,11	26,99	1,16	11,86	5,93	22,51	296,5	65,63
	T6(AO 6% + HMA 10 encapsulados)	25,00	51,04	27,86	15,14	29,18	1,02	12,72	6,36	23,18	318,0	64,10
	T7(AO 6% + HMA 20 encapsulados)	25,00	58,09	25,73	13,98	26,72	1,10	11,75	5,88	32,36	293,8	55,89
	T8(AO 6% + HMA 30 encapsulados)	25,00	48,67	28,00	15,22	29,34	1,08	12,78	6,39	20,67	319,5	66,55
	T9(AO 8% + HMA 0 encapsulados)	25,00	53,26	26,86	14,60	28,02	1,15	12,26	6,13	26,40	306,5	61,34
	T10(AO 8% + HMA 10 encapsulados)	25,00	60,83	28,17	15,31	29,53	1,06	12,86	6,43	32,66	321,5	54,48
	T11(AO 8% + HMA 20 encapsulados)	25,00	60,48	26,96	14,65	28,14	1,07	12,31	6,16	33,52	307,8	54,17
	T12(AO 8% + HMA 30 encapsulados)	25,00	70,65	28,77	15,64	30,23	0,87	13,13	6,57	41,88	328,3	44,99
	T13(AO 10% + HMA 0 encapsulados)	25,00	64,09	25,50	13,86	26,45	1,06	11,64	5,82	38,59	291,0	49,77
	T14(AO 10% + HMA 10 encapsulados)	25,00	61,23	27,22	14,79	28,44	1,07	12,43	6,22	34,01	310,8	53,56
	T15(AO 10% + HMA 20 encapsulados)	25,00	77,84	30,17	16,40	31,85	0,85	13,77	6,89	47,67	344,3	38,56
	T16(AO 10% + HMA 30 encapsulados)	25,00	64,62	28,17	15,31	29,54	0,96	12,86	6,43	36,45	321,5	50,69
2	T1(AO 0% + HMA 0 encapsulados)	25,00	48,00	24,13	13,11	24,87	1,15	11,02	5,51	23,87	275,5	65,11
	T2(AO 0% + HMA 10 encapsulados)	25,00	39,84	21,97	11,94	22,37	1,27	10,03	5,02	17,87	250,8	72,10
	T3(AO 0% + HMA 20 encapsulados)	25,00	48,76	26,62	14,47	27,75	1,13	12,15	6,08	22,14	303,8	65,71
	T4(AO 0% + HMA 30 encapsulados)	25,00	46,42	24,12	13,11	24,86	1,16	11,01	5,51	22,30	275,3	66,69
	T5(AO 6% + HMA 0 encapsulados)	25,00	45,25	23,87	12,97	24,56	1,19	10,90	5,45	21,38	272,5	67,72
	T6(AO 6% + HMA 10 encapsulados)	25,00	52,00	27,12	14,74	28,33	0,90	12,38	6,19	24,88	309,5	62,74
	T7(AO 6% + HMA 20 encapsulados)	25,00	60,91	22,73	12,36	23,25	1,10	10,37	5,19	38,18	259,3	51,45
	T8(AO 6% + HMA 30 encapsulados)	25,00	50,00	22,98	12,49	23,54	1,09	10,49	5,25	27,02	262,3	62,49
	T9(AO 8% + HMA 0 encapsulados)	25,00	56,87	24,68	13,41	25,50	1,17	11,27	5,64	32,19	281,8	56,54

	T10(AO 8% + HMA 10 encapsulados)	25,00	56,97	26,12	14,20	27,17	1,05	11,92	5,96	30,85	298,0	57,23
	T11(AO 8% + HMA 20 encapsulados)	25,00	56,97	22,98	12,49	23,54	1,09	10,49	5,25	33,99	262,3	55,52
	T12(AO 8% + HMA 30 encapsulados)	25,00	61,59	24,19	13,15	24,94	1,03	11,04	5,52	37,40	276,0	51,56
	T13(AO 10% + HMA 0 encapsulados)	25,00	59,28	24,33	13,22	25,10	1,06	11,11	5,56	34,95	277,8	53,94
	T14(AO 10% + HMA 10 encapsulados)	25,00	55,92	22,74	12,36	23,26	1,04	10,38	5,19	33,18	259,5	56,44
	T15(AO 10% + HMA 20 encapsulados)	25,00	55,74	24,36	13,24	25,14	1,06	11,12	5,56	31,38	278,0	57,50
	T16(AO 10% + HMA 30 encapsulados)	25,00	59,44	24,22	13,16	24,97	1,05	11,06	5,53	35,22	276,5	53,72
3	T1(AO 0% + HMA 0 encapsulados)	25,00	42,86	24,74	13,45	25,58	1,18	11,29	5,65	18,12	282,3	70,59
	T2(AO 0% + HMA 10 encapsulados)	25,00	49,91	23,25	12,64	23,85	1,11	10,61	5,31	26,66	265,3	62,73
	T3(AO 0% + HMA 20 encapsulados)	25,00	37,38	21,32	11,59	21,62	1,29	9,73	4,87	16,06	243,3	74,21
	T4(AO 0% + HMA 30 encapsulados)	25,00	39,83	24,64	13,39	25,46	1,27	11,25	5,63	15,19	281,3	73,56
	T5(AO 6% + HMA 0 encapsulados)	25,00	46,48	18,18	9,88	17,99	1,17	8,30	4,15	28,30	207,5	63,40
	T6(AO 6% + HMA 10 encapsulados)	25,00	43,95	21,49	11,68	21,82	1,24	9,81	4,91	22,46	245,3	67,73
	T7(AO 6% + HMA 20 encapsulados)	25,00	59,64	24,63	13,39	25,44	1,10	11,24	5,62	35,01	281,0	53,75
	T8(AO 6% + HMA 30 encapsulados)	25,00	51,33	23,22	12,62	23,81	1,09	10,60	5,30	28,11	265,0	61,29
	T9(AO 8% + HMA 0 encapsulados)	25,00	53,67	23,46	12,75	24,09	1,16	10,71	5,36	30,21	267,8	59,08
	T10(AO 8% + HMA 10 encapsulados)	25,00	57,77	22,38	12,16	22,84	1,06	10,22	5,11	35,39	255,5	54,39
	T11(AO 8% + HMA 20 encapsulados)	25,00	61,10	21,23	11,54	21,52	1,03	9,69	4,85	39,87	242,3	50,44
	T12(AO 8% + HMA 30 encapsulados)	25,00	61,84	16,59	9,01	16,14	0,95	7,58	3,79	45,25	189,5	47,17
	T13(AO 10% + HMA 0 encapsulados)	25,00	62,57	26,86	14,60	28,02	0,87	12,26	6,13	35,71	306,5	52,03
	T14(AO 10% + HMA 10 encapsulados)	25,00	57,04	27,05	14,70	28,24	1,06	12,35	6,18	29,99	308,8	57,66
	T15(AO 10% + HMA 20 encapsulados)	25,00	64,35	32,36	17,59	34,38	0,95	14,77	7,39	31,99	369,3	53,24
	T16(AO 10% + HMA 30 encapsulados)	25,00	62,28	31,48	17,11	33,36	1,00	14,37	7,19	30,80	359,3	54,83
Medias	T1(AO 0% + HMA 0 encapsulados)	25,00	48,15	25,44	13,83	26,38	1,14	11,61	5,81	22,71	29,03	65,68
	T2(AO 0% + HMA 10 encapsulados)	25,00	42,99	23,96	13,02	24,67	1,23	10,94	5,47	19,03	27,34	70,04
	T3(AO 0% + HMA 20 encapsulados)	25,00	45,22	24,41	13,27	25,19	1,19	11,14	5,57	20,81	27,85	68,05
	T4(AO 0% + HMA 30 encapsulados)	25,00	44,86	24,73	13,44	25,56	1,19	11,29	5,64	20,14	28,22	68,58
	T5(AO 6% + HMA 0 encapsulados)	25,00	46,74	22,67	12,32	23,18	1,17	10,35	5,18	24,06	25,88	65,58
	T6(AO 6% + HMA 10 encapsulados)	25,00	49,00	25,49	13,85	26,44	1,05	11,64	5,82	23,51	29,09	64,86
	T7(AO 6% + HMA 20 encapsulados)	25,00	59,55	24,36	13,24	25,14	1,10	11,12	5,56	35,18	27,80	53,70
	T8(AO 6% + HMA 30 encapsulados)	25,00	50,00	24,73	13,44	25,56	1,09	11,29	5,65	25,27	28,23	63,44

T9(AO 8% + HMA 0 encapsulados)	25,00	54,60	25,00	13,59	25,87	1,16	11,41	5,71	29,60	28,53	58,99
T10(AO 8% + HMA 10 encapsulados)	25,00	58,52	25,56	13,89	26,51	1,06	11,67	5,83	32,97	29,17	55,37
T11(AO 8% + HMA 20 encapsulados)	25,00	59,52	23,72	12,89	24,40	1,06	10,83	5,42	35,79	27,08	53,38
T12(AO 8% + HMA 30 encapsulados)	25,00	64,69	23,18	12,60	23,77	0,95	10,58	5,29	41,51	26,46	47,91
T13(AO 10% + HMA 0 encapsulados)	25,00	61,98	25,56	13,89	26,52	1,00	11,67	5,84	36,42	29,18	51,91
T14(AO 10% + HMA 10 encapsulados)	25,00	58,06	25,67	13,95	26,65	1,06	11,72	5,86	32,39	29,30	55,89
T15(AO 10% + HMA 20 encapsulados)	25,00	65,98	28,96	15,74	30,46	0,95	13,22	6,61	37,01	33,05	49,77
T16(AO 10% + HMA 30 encapsulados)	25,00	62,11	27,96	15,19	29,29	1,00	12,76	6,38	34,16	31,91	53,08

Loja, 13 de enero de 2025

Yo, **Jenny Obdulia Cuenca Chinchay**, portadora de la cédula de identidad Nro **1104929318**, Licenciada en Ciencias de la Educación Mención Idioma Inglés y Magister en Educación Mención en Pedagogía.

CERTIFICO:

Que poseo conocimientos y dominio de los idiomas español e inglés, y que la traducción del resumen del documento adjunto, correspondiente al Trabajo de Integración Curricular denominado: **Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y hongos micorrízicos sobre la macro porosidad del suelo y el desarrollo vegetativo del cafeto (*Coffea-arabica* L.), en La Argelia, provincia de Loja**, de autoría del estudiante **Angel Francisco Guayanay Castillo**, con cédula de identidad Nro **1105143547**, es verdadero y correcto según mi mejor saber y entender.

Lo anteriormente expuesto lo certifico en honor a la verdad, autorizando al portador del presente documento para los trámites que considere necesarios.

Atentamente,


Lcda. Jenny Obdulia Cuenca Chinchay, Mg. Sc

C.I.: 1104929318

Celular: 0969244218

Correo electrónico: jennycuenca46@gmail.com

Registro Senescyt: 1008-14-1285669 / 1050-2022-2562205