



ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCIÓN VEGETAL Y ECOSISTEMAS
AGROFORESTALES

Tesis

Rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín

Para optar el Grado Académico de Doctor en Producción Vegetal y
Ecosistemas Agroforestales

AUTOR:

Wilder Macedo Córdova

<http://orcid.org/0000-0002-1700-1742>

ASESOR

Dr. Geomar Vallejos Torres

<https://orcid.org/0000-0001-7084-977X>

Tarapoto, Perú

2023



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Vea una copia de esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCION VEGETAL Y ECOSISTEMAS
AGROFORESTALES

Tesis

Rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín

Para optar el grado académico de Doctor en Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales

Autor:

Wilder Macedo Córdova

<http://orcid.org/0000-0002-1700-1742>

Asesor:

Dr. Geomar Vallejos Torres

<https://orcid.org/0000-0001-7084-977X>

Tarapoto, Perú

2023



ESCUELA DE POSGRADO

UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCION VEGETAL Y ECOSISTEMAS
AGROFORESTALES

Tesis

Rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín

Para optar el grado académico de Doctor en Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales

Autor:

Wilder Macedo Córdova
<http://orcid.org/0000-0002-1700-1742>

Asesor:

Dr. Geomar Vallejos Torres
<https://orcid.org/0000-0001-7084-977X>

Tarapoto, Perú

2023



ESCUELA DE POSGRADO

UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCION VEGETAL Y ECOSISTEMAS
AGROFORESTALES

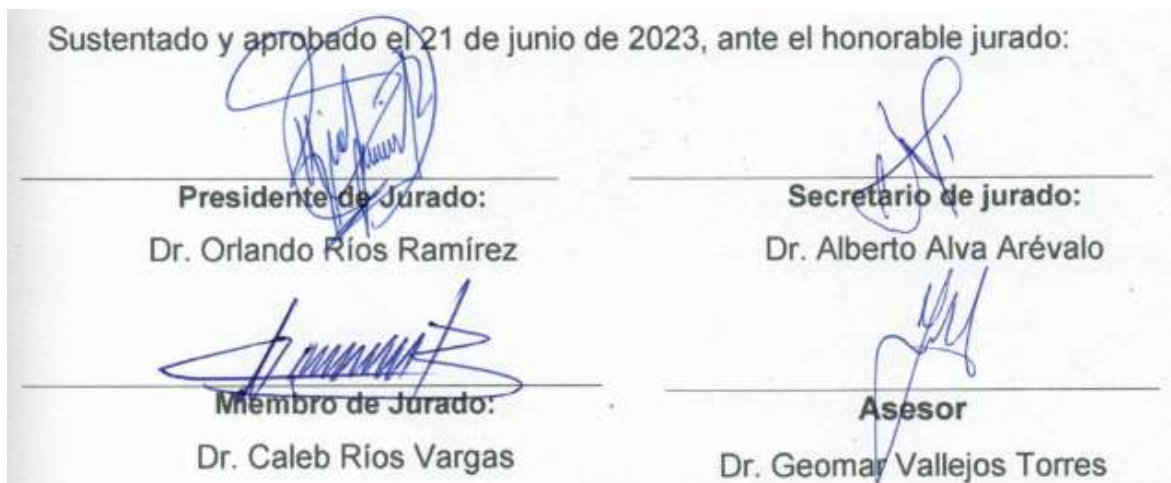
Tesis

Rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín

Para optar el grado académico de Doctor en Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales

Autor:

Wilder Macedo Córdova



Tarapoto, Perú

2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN-T

Escuela de Posgrado



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para estudiar y escuchar la sustentación y defensa del Trabajo de Tesis, modo presencial, presentado por:

Ing. Wilder Macedo Córdova

Con el asesoramiento del Dr. Geomar Vallejos Torres.

"Rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono del suelo en ecosistemas con café en San Martín"

Teniendo en consideración los méritos del referido trabajo, así como los conocimientos demostrados por el sustentante, lo declaramos: APROBADO

MUY BUENO


Con el calificativo (*)


DIECIOCHO (18)


En consecuencia, queda en condición de ser considerado APTO por el Consejo Universitario y recibir el Grado Académico de Doctor, de conformidad con lo estipulado en el Artículo 30° del Reglamento de Tesis de la Escuela de Posgrado de la UNSM.

Tarapoto, 21 de junio de 2023.


Dr. Orlando Ríos Ramírez
Presidente


Dr. Alberto Alva Arévalo
Secretario


Dr. Caleb Ríos Vargas
Miembro


Dr. Geomar Vallejos Torres
Asesor

(*) De acuerdo con el Artículo 40° del Reglamento General de Ciencia, Tecnología e Innovación (RG - CTI) la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, estas deberán ser calificadas con términos de: BUENO, MUY BUENO, EXCELENTE, también considerar la nota

© Wilder Macedo Córdova 2023

Todos los derechos reservados



ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCION VEGETAL Y ECOSISTEMAS
AGROFORESTALES

Tesis

Rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín

Para optar el grado académico de Doctor en Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales

El suscrito declara que el presente trabajo de tesis es original, en su contenido y forma.

	
Ejecutor	Asesor:
Wilder Macedo Córdova	Dr. Geomar Vallejos Torres

Tarapoto, Perú

2023

Declaratoria de autenticidad

Yo, Wilder Macedo Córdova con DNI N° 05614396 de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias Programa de Doctorado en Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales de la Universidad Nacional de San Martín autor de la tesis que lleva como título: “Rol de la Glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín”.

Declaro bajo juramento que:

1. La Tesis presentada es de mi autoría.
2. La redacción fue realizado teniendo en cuenta las citas y referencias bibliográficas para las fuentes consultadas.
3. La información contenida n esta tesis, n fue auto plagiada.
4. Los resultados de esta investigación debe considerarse como una contribución a lo investigado, debido que los datos son reales, no fueron alterados, ni copiados.

Por lo antes mencionado, asumo la responsabilidad y posibles consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto.

Tarapoto, 21 de junio del 2023.



Ficha de identificación

<p>Título del proyecto</p> <p>Rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín</p>	<p>Área de investigación: Ciencias Agrícolas y Forestales</p> <p>Línea de investigación: Silvicultura y Manejo Forestal Sostenible.</p> <p>Sublínea de investigación: Agroforestería</p> <p>Grupo de investigación: Manejo Forestal Sostenible, con resolución - 050-2021-UNSM-T/FCA/CF/NLU</p> <p>Tipo de investigación: Básica <input checked="" type="checkbox"/>, Aplicada <input type="checkbox"/>, Desarrollo experimental <input type="checkbox"/></p>
--	---

<p>Autor:</p> <p>Wilder Macedo Córdova</p>	<p>Facultad de Ciencias Agrarias</p> <p>Escuela de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias</p> <p>http://orcid.org/0000-0002-1700-1742</p>
---	--

<p>Asesor:</p> <p>Geomar Vallejos Torres</p>	<p>Dependencia local de soporte:</p> <p>Facultad de Ciencias Agrarias</p> <p>Escuela Profesional de Agronomía</p> <p>Unidad o Laboratorio Agronomía</p> <p>https://orcid.org/0000-0001-7084-977X</p>
---	---

Dedicatoria

A mi querida madre, que descansa en paz en el cielo y cuya influencia sigue guiando mi mente, inspirándome constantemente a superarme y alcanzar mis metas académicas.

A mi padre, quien con sus consejos y enseñanzas me ha convertido en una persona comprometida con mis estudios para ser una persona de bien.

A mis hermanos, quienes siempre me brindaron apoyo moral a lo largo de mi educación superior.

A mis hijos: Xioxana Giomira, Wilder, Abrahán, Wilma y Donato, por ser mi fuente de fortaleza para seguir este camino de superación, y por ser una motivación para ellos en sus propias vidas.

A Olga, mi esposa, compañera y mejor amiga, por estar siempre a mi lado, ayudarme en los momentos más difíciles de la vida e impulsar mi carrera.

A todos los que han contribuido de algún modo a mi desarrollo académico y profesional.

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a la Universidad Nacional de San Martín, en particular a su Escuela de Posgrado, por permitirme formar parte de su comunidad académica y por impartirme nuevos conocimientos científicos.

Al proyecto "Variaciones del carbono y población micorrízica mediada por condiciones climáticas, manejo con café y bosque en San Martín", financiado por el Instituto de Investigación y Desarrollo (IlyD) de la Universidad Nacional de San Martín (UNSM), según Resolución N° 611-2022-UNSM/CU-R.

Al Dr. Geomar Vallejos Torres por su orientación científica en el inicio y culminación de este proyecto de investigación, así como por su permanente apoyo.

Gracias a los miembros del comité de evaluación por su asesoría durante este proceso de estudio.

Índice general

Ficha de identificación.....	7
Dedicatoria.....	8
Agradecimientos.....	9
Índice general.....	10
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras.....	13
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN.....	16
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	19
2.2. Principios teóricos.....	21
2.3. Definición de términos básicos.....	24
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación.....	26
3.1.1. Lugares de estudio.....	26
3.1.2. Periodo de ejecución.....	27
3.1.3. Autorizaciones y permisos.....	27
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad.....	27
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales.....	27
3.2.1 Variables principales.....	27
3.2.2 Variables secundarias.....	27
3.3. Procedimientos de la investigación.....	28
b) Glomalina total (GT).....	34

	11
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES	53
ANEXOS.....	69

Índice de tablas

Tabla 1. Característica geográficas de los cuatro tipos de cobertura vegetal empleados en el estudio.	27
Tabla 2. Característica físico-químico de suelos en los diferentes cobertura vegetal.....	35
Tabla 3. Análisis de varianza para la colonización y números de esporas evaluadas.....	38
Tabla 4. Prueba de Tukey para la colonización y números de esporas evaluadas.....	39
Tabla 5. Análisis de varianza para el análisis de glomalina.....	42
Tabla 6. Prueba de Tukey para la glomalina evaluada en muestras de suelo.....	46
Tabla 7. Análisis de varianza para el contenido de pH, limo y carbono orgánico del suelo	45
Tabla 8. Prueba de Tukey para el pH, limo y carbono orgánico del suelo	46
Tabla 9. Datos promedios de textura y micorrización.....	68
Tabla 10. Datos promedios de contenido de carbono en diferente cobertura vegetal	69

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio	25
Figura 2. Selección de diferentes coberturas vegetales para el estudio.	28
Figura 3. Apertura de calicatas para toma de muestras.	28
Figura 4. Toma de muestras para determinación de densidad aparente del suelo	30
Figura 5. Muestreo de suelos para determinación de la colonización micorrízica.....	30
Figura 6. Evaluación de la colonización micorrízica.....	31
Figura 7. Colonización micorrízica de raíces de café y especies agroforestales	32
Figura 8. Determinación de la población micorrízica.....	33
Figura 9. Muestreo de suelos para análisis de glomalina	34
Figura 10. Evaluación de la biomasa agroforestal..	36
Figura 11. Correlación entre la colonización micorrízica y carbono orgánico del suelo	39
Figura 12. Correlación entre el número de esporas de HMA y el carbono orgánico del suelo.....	40
Figura 13. Correlación entre la glomalina de suelos y el carbono orgánico de suelos	43
Figura 14. Correlación entre el pH del suelo y el carbono orgánico de los suelos con diferente cobertura vegetal.....	46
Figura 15. Correlación entre el limo del suelo y el carbono orgánico de los suelos con diferente cobertura vegetal.....	47
Figura 16. Prueba de Tukey para el contenido de carbono sobre el suelo y debajo del suelo	49

RESUMEN

La amazonia peruana se ha visto vulnerado en sus recursos forestales, esto ha generado la pérdida del carbono orgánico presente en los suelos y biomasa aérea. En este estudio se estimó el rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín, ubicadas en los distritos de Tabalosos, San Martín. Medimos el contenido de carbono en diferentes sistemas de siembra de café y bosque secundario aledaño y su correlación con diferentes variables como colonización y conteo de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), glomalina, pH y limo de suelo. Los análisis fueron realizados empleando el lenguaje de programación R versión 4.0.2. Para analizar el efecto de los factores cobertura y profundidad y su interacción, los datos de variables edáficas y micorrízicas fueron sometidos a un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de Tukey con una probabilidad de error del 5%; en todos los escenarios, independientemente del nivel de correlación o de la significancia, se ajustó modelo de regresión lineal. Los resultados del estudio indican que se encontró mayor colonización en café como monocultivo con 44,06% en la superficie, mientras que el número de esporas mostró valores de 86,86 y 49,84 en 100 gramos de suelo. El contenido de glomalina, mostró diferencias significativas tanto en la cobertura vegetal como en las profundidades de suelo. El sistema de bosque secundario a una profundidad superficial presentó mayor pH de 6,75. Respecto al contenido de limo, el café con guaba presento el mayor contenido con 23,28 %. Asimismo, hubo mayor concentración de carbono sobre el suelo en bosque secundario con un valor superior a 70 t ha^{-1} y mayor contenido de carbono subterráneo en la misma cobertura vegetal estudiado con $10,67 \text{ t ha}^{-1}$. Se concluye que los árboles de sombra en los sistemas cafetaleros y bosques secundarios contribuyen al almacenamiento de carbono; al mismo tiempo que el contenido de glomalina contribuye con el secuestro de carbono orgánico del suelo.

Palabras clave: Bosque secundario, café, colonización micorrízica, carbono sobre y debajo del suelo, glomalina.

ABSTRACT

The Peruvian Amazon has been vulnerable in its forestry resources, which has generated the loss of organic carbon present in soils and aerial biomass. This study estimated the role of glomalin in soils carbon storage of coffee ecosystems in San Martin, located in the district of Tabalosos, San Martin. Carbon content was measured in different coffee and surrounding secondary forest and its correlation with different variables such as colonization and spore count of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), glomalin, soil pH and soil silt. The analyses were carried out using the R programming language version 4.0.2. To analyze the effect of the cover and depth factors and their interaction, the edaphic and mycorrhizal variable data were subjected to an analysis of variance and a Tukey mean comparison test with a 5% probability of error; in all scenarios, regardless of the level of correlation or significance, a linear regression model was fitted. The results of the study indicate that the highest colonization was found in coffee as a monoculture with 44,06 % on the surface, while the number of spores showed values of 86,86 and 49,84 per 100 grams of soil. The glomalin content showed significant differences in both vegetation cover and soil depths. The coffee system as polyculture at a shallow depth presented a higher pH of 6,75. Regarding the silt content, coffee with "guaba" showed the highest content with 23,28 %. Likewise, there was a higher concentration of aboveground carbon in secondary forest with a value higher than 70 t ha^{-1} and a higher content of belowground carbon in the same vegetation cover studied with $10,67 \text{ t ha}^{-1}$. It is concluded that shade trees in coffee systems and secondary forests contribute to carbon storage; at the same time the glomalin content contributes to soil organic carbon sequestration.

Keywords: secondary forest, coffee, mycorrhizal colonization, above and below ground carbon, glomalin.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

El consumo actualmente del café se ha estimado por encima de 2 400 millones de tazas por día a nivel mundial y con un incremento promedio por año de 2,4 % en los últimos 10 años; convirtiéndose así el café es una de las bebidas principales presente en la alimentación de la población mundial (International Coffee Organization [ICO], 2016), en Perú se cultiva generalmente *Coffea arabica*, distribuida en cinco departamentos; siendo estas San Martín, Junín, Cajamarca, Amazonas y Cuzco, con el 86% de rendimiento en grano. San Martín lidera con un 27 %, seguido por Junín (21 %) y Cajamarca (18 %). En el 2020, San Martín incrementó la producción en un 20 % respecto al año anterior (Caballero, 2021, p.09), sin embargo, los ecosistemas agroforestales de café son más vulnerables que los sistemas de cacao al cambio climático; asimismo, las especies agroforestales asociados al cultivo son vulnerables y sensibles al cambio climático (Sousa et al., 2021, p.11).

Větrovský et al. (2019), el cambio climático también podría afectar el funcionamiento de los ecosistemas debido a las estrechas tolerancias climáticas de los principales taxones de hongos. Se indica que el cambio climático puede influir en la sobrevivencia de las micorrizas arbusculares (HMA). Teniendo en cuenta la magnitud del cambio global en curso, es de gran importancia determinar cómo el clima y otros factores ambientales afectan la diversidad y distribución de las comunidades fúngicas (Hillebrand, 2004, p.192).

Los simbioses fúngicos pueden beneficiar a las plantas al minimizar los factores estresantes abióticos relacionados al cambio climático, como el calor y la sequía (Kivlin et al. 2013, p.57), pero la distribución de estos simbioses puede estar impulsada por mecanismos distintos al clima (Kreft et al. 2007, p 104.), sin embargo, debido a que la distribución geográfica y las preferencias ambientales de casi todos los hongos siguen siendo desconocidas (Tedersoo et al. 2014, p.1052), su estado actual y las futuras amenazas a su existencia son difíciles de evaluar, debido a la importancia de la interacción plantas y hongos, la capacidad de predecir cambios en las distribuciones de hongos podría ayudar a comprender o predecir cambios en el ecosistema.

Especialmente San Martín, donde se cultivan aproximadamente 100 927,00 ha. de café; 44 857,00 productores están directamente involucrados y un total de 224 285,00 agricultores es su principal ingreso (Ministerio de Agricultura [MINAGRI], 2014), hay informes que sugieren que los HMA pueden ayudar a reducir la roya; pero ningún estudio

parece haber investigado como afectan HMA la resistencia a roya amarilla del cafeto en términos de morfología y producción. Es así que la producción de café en la Amazonía peruana especialmente en la región San Martín, puede verse afectada por el cambio climático, principalmente por los cambios esperados en la temperatura y los patrones de precipitaciones (Robiglio et al., 2017, p.20), además los caficultores se encuentran en una situación vulnerable debido a la alta presión de enfermedades y al mal manejo de los nutrientes de los cultivos (Ramírez-Builes et al., 2020, p.56).

En este contexto, la utilización de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) representa una opción promisoría para incrementar sosteniblemente el rendimiento del café y otros cultivos en nuestra región; debido a que los HMA realizan la simbiosis con las raíces de plantas estas desarrollan una red micelial en la rizosfera (Marro et al., 2014, p.57), facilitando la asimilación de agua y nutrientes del suelo, y existe evidencia de que inducen tolerancia a enfermedades en las plantas mejorando su productividad (Vallejos-Torres et al., 2021, p.75).

Además, mejoran el contenido de proteína del suelo vinculado a la glomalina (GRSP), una glicoproteína insoluble que se acumula tanto en el suelo como en las raíces de las plantas (Seguel et al. 2008; Chen et al. 2018, p. 13). GRSP promueve la estabilidad de los agregados del suelo, influyendo de manera positiva en su fertilidad, además coadyuva al almacenamiento de carbono en el suelo, así como también al crecimiento de las plantas bajo condiciones de estrés abiótico (Irving et al., 2021, p. 60). De tal manera que los HMA cumplen un rol primordial como biofertilizantes en el manejo de cultivos en campo, mejorando la condición de agregados del suelo promoviendo el desarrollo vegetativo de las plantas (Diagne et al. 2020, p.03), sus beneficios sobre el desarrollo vegetativo y la asimilación de nutrientes de las plantas han sido estudiados en varias especies de interés económico como *Coffe arabica* (Vallejos-Torres et al., 2020, p.04), *Phaseolus vulgaris* (Ibijbijen et al., 1996, p.354), *Prunus cerasifera* (Berta et al., 1995, p.76), de tal manera que la inoculación de HMA en plantas representa una alternativa para la producción de cultivos en San Martín.

Para ello, el objetivo principal fue: Evaluar el rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín; para lo cual se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la correlación del almacenamiento de carbono presente en el suelo con la colonización y la población de micorrizas arbusculares en fincas de café y bosque secundario en Lamas, San Martín.

- Determinar la correlación del almacenamiento de carbono presente en el suelo con el contenido de glomalina en fincas de café y bosque secundario en Lamas, San Martín.
- Determinar la correlación del almacenamiento de carbono presente en el suelo con el contenido de pH y limo en fincas de café y bosque secundario en Lamas, San Martín.
- Determinar las concentraciones de carbono en diferente compartimiento en fincas de café y bosque secundario en Lamas, San Martín.

.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

Se llevó a cabo una investigación exhaustiva destinada a analizar los impactos positivos del calentamiento en lo que respecta al depósito de carbono en árboles de regiones templadas, así como los tipos de micorrizas involucradas en este proceso. Para este propósito, se utilizó una amplia base de datos derivados de inventarios forestales que contenía información de más de medio millón de árboles distribuidos en 1,910 parcelas con una extensión de 0.09 hectáreas cada una, ubicadas en la región nororiental de China. La recopilación de estos datos se realizó siguiendo el protocolo de la toma de muestra recomendado por (IPCC, 2015) entre los años 2010 y 2013. Previamente a la aplicación de análisis estadísticos, se efectuó la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de los datos. Con el fin de explorar el impacto de los diferentes tipos de árboles en relación al almacenamiento de carbono, se realizó el análisis de varianza de una sola vía (ANOVA). Además, se utilizaron modelos lineales mixtos para investigar las relaciones entre micorrizas arbusculares (HMA, por sus siglas en inglés) y su capacidad de retención de carbono. Todos estos procedimientos estadísticos se realizaron utilizando el software R versión 4.1.0. Los resultados revelaron una evaluación positiva significativa entre el almacenamiento de carbono en los árboles y la temperatura media anual (MAT). Además, se midieron el efecto de los árboles y la simbiosis con los HMA en situaciones de sequía y en calentamiento, en donde se observó que el calentamiento contribuye al incremento del almacenamiento de carbono en árboles que mantenían una asociación con los HMA. En conclusión, los resultados de esta investigación indican que el incremento de la diversidad de árboles micorrizados tiene un potencial para actuar como sumideros de carbono y, al mismo tiempo, disminuir la susceptibilidad en el crecimiento de los árboles provocados por el calentamiento por las variaciones en la precipitación. Estos resultados contribuyen significativamente al entendimiento de la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales y tienen importantes implicaciones para la mitigación del cambio climático (Yan et al., 2022).

Goncalves et al. (2021, p.421), cuantificaron el secuestro de carbono y su impacto económico potencial en los ecosistemas agroforestales (EA) de café en Brasil. El tamaño total de las propiedades varió de 12 a 32 ha, donde los sistemas agroforestales de café (SAC) ocupó 1 ha de cada predio. Desde más de 50 SAC implementados en la región, 20 SAC de las cuales 16 fueron de dos años y cuatro tenían 16 años. Todos los modelos de estimación de biomasa empleados y todos los análisis estadísticos requeridos lo realizaron utilizando R Software v.3,2,3; con un nivel de confianza del 95 %. Utilizaron fórmulas

alométricas para determinar si hay existencia de carbono. La tasa de descuento y precio del carbono aplicado fue del 6 % y 5,1 Mg CO₂ e⁻¹, respectivamente. La reserva media total de carbono en SAC de dos y 16 años fue de 1,38 ± 0,63 Mg C ha⁻¹ y 59,69 ± 32,63 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Todas las SAC presentaron periodos de recuperación de dos años, con un VAN medio de US\$ 50 585,91 y una TIR media de 89,93 %. El impacto de los ingresos por carbono en el VAN y la TIR fue de US\$ 148,80 y 0,24 %, respectivamente. Los autores concluyen que el impacto económico de la captura de carbono no fomenta la adopción de sistemas agroforestales con café. Sin embargo, estos sistemas pueden ser una opción de uso de la tierra económicamente viable que secuestran grandes cantidades de carbono comparables a los parches de bosque.

Clemente (2021), en su investigación "Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú", estudió "el potencial de la captura de carbono en los sistemas agroforestales para lograr una agricultura sostenible económica y ecológicamente". Como resultado de los sistemas agroforestales evaluados en Huánuco y Loreto obtuvo valores de 344,24 Mg/ha de carbono en un sistema agroforestal de cacao y 288,98 Mg/ha en un sistema agroforestal de castaña, umarí, tornillo y Pashaco. El autor llegó a la conclusión que, estos sistemas ofrecen una tecnología económica y ambientalmente viable que actualmente se busca para mitigar las consecuencias de la deforestación y el calentamiento global. Son la segunda mejor alternativa para secuestrar carbono después de los bosques naturales.

Villoslaba (2017), en su investigación titulada "Evaluación del potencial ecosistémico de un bosque secundario y su influencia en la captura de carbono, en el sector Puerto Motilones, Distrito de Moyobamba", evaluó especies forestales utilizando un muestreo sistemático con 03 transectos de similar área (10x150 m²); obtuvo una media de 234,14 t ha⁻¹ de carbono almacenado de la biomasa vegetal de las especies identificadas. Esta cantidad indica que el bosque secundario, que tiene una superficie total de 7,13 ha, absorbe 520,31 t ha⁻¹ de carbono. El autor llegó a la conclusión de que las cantidades de biomasa agroforestal, que fueron 503,11 tn/ha y 17,20 tn/ha, respectivamente, indican un impacto muy sustancial. La importancia ecológica del bosque frente al secuestro de carbono es proporcional a la cantidad global de biomasa acumulada.

Zhang et al. (2022), En la investigación "La acumulación de proteínas del suelo relacionada con la glomalina beneficia el secuestro de carbono en el suelo", evaluación de cómo la glomalina relacionada con las proteínas del suelo (GRSP) contribuye al mejoramiento de la calidad del suelo en una zona costera tropical a través de cuatro prácticas diferentes de restauración: suelo estéril, plantación de *Eucalyptus exserta*, bosque mixto latifoliado y bosque natural secundario. Los hallazgos dieron señales que la recuperación de la flora

aumentó significativamente tanto el GRSP extraíble como el GRSP total en comparación con el suelo estéril, con incrementos de 3.9 a 12.3 veces y 1.9 a 4.6 veces, respectivamente. Concluyen que las zonas de bosques artificiales, bosques mixtos con árboles nativos representan una alternativa para recuperar tierras altamente erosionadas, mejorar los agregados del suelo e incrementar el secuestro de carbono.

En un estudio de “Caracterización de diferentes fracciones de tamaño molecular de la proteína del suelo vinculado con la glomalina del suelo forestal y su interacción con el fenantreno”, evaluó el GRSP en el suelo, se dividió en tres fracciones de peso molecular (M_w) de GRSP (<3,000, 3,000–10,000 y >10,000 Da), cuyas características y capacidad de unión de los PAH se realizaron mediante el uso de absorción UV-visible. fluorimetría de extinción y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. Como resultados obtuvo que el GRSP estaba compuesto por abundantes compuestos, tenía una amplia distribución de peso molecular y la fracción >10.000 Da M_w era dominante. Los autores concluyen que sugirieron diferentes fracciones de GRSP M_w que podrían influir en el destino, la disponibilidad y la toxicidad de los PAH en el suelo mediante su interacción (Zhou et al., 2022).

2.2. Principios teóricos

2.2.1. Generalidades del cultivo del café

Nuestro país cuenta con 430 000 ha. sembradas de café; donde la región San Martín concentra en promedio 23,2 % de la producción (MINAGRI, 2014), predominando el café arábico, catimora, típica, caturra, pache y borbón los cuales crecen muy bien con un 90 % de sombra a altitudes superiores a 1 200 m.s.n.m. representando un 75 % de producción, con medias de 14 qq/ha. En el país los productores mayores están ubicados en Junín, San Martín, Cajamarca y Cusco representando una producción del 24; 23; 17 y 11 % respectivamente (MINAGRI, 2014).

2.2.2. Glomalina presente en suelos micorrizados

Las micorrizas arbusculares tienen mucha importancia en diversos agroecosistemas, reducen la erosión y mejora la estructura de los suelos, la glomalina, como proteína es producto de las esporas e hifas de Glomeromycota (Gao et al., 2019, p.112).

También el estudio de la glomalina fue analizado por Wright y Upadhyaya et al. (1996), resaltando sus bondades en muchos artículos (Kumar et al., 2018); pero su investigación es discutida por falta de especificidad en sus determinaciones (Gao et al. 2019, p.112), por esto la glomalina es medida como proteína del suelo que está relacionada con la glomalina

(GRSP). Esta proteína es vertida por las hifas y esporas de HMA, y se cuantifica como proteína del suelo (Wright y Upadhyaya, 1996, p.161).

2.2.3. Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)

Wipf et al. (2019), la asociación con micorrizas afecta ≤ 80 % a plantas cultivadas, sus hifas atraviesan la epidermis de la raíz colonizando y formando arbusculas de hifas encerradas, denominada membrana periarbuscular permitiendo que las plantas mejoren la utilización de los nutrientes naturales de la tierra y respondiendo adecuadamente a restricciones ambientales (Lenoir et al., 2016, p.123.), principalmente las variaciones climáticas (Torres et al., 2018, p.03), estrés por sequía, salinidad y la polución mediante metales pesados también, estas plantas micorrízicas se adecúan a restricciones bióticas mostrando resistencia a patógenos (Torres et al., 2018, p.03).

2.2.4. Efectos de los HMA en el cultivo de café.

Del Águila et al. (2018), menciona que el tamaño de las hifas extraradical de las micorrizas está relacionado con el tamaño de los cafetos, así también (Al-Areqi et al., 2014, p.187), manifestó que los cafetos inoculados con micorrizas al inicio de su desarrollo vegetativo produjeron un incremento de biomasa radicular.

Estos estudios demuestran que los HMA ejercen una acción positiva en el desarrollo morfológico de los cafetos, mostrando mayor influencia en consorcios que tenían variabilidad de especies aclimatados al lugar. Su eficacia de 11 especies de HMA está dado por su adecuada aclimatación, selección de la cepa para tener un adecuado abastecimiento de nutrientes y la calidad del sustrato donde crecerán las plantas. También otra causa es la enmienda con compost, el cual incide positivamente en la cantidad de ramas afectadas debido a la variabilidad de especies existentes en la unión de HMA, influenciado por la calidad del sustrato y suelo, estudiados en una plantación secundaria de tres años.

Durán et al. (2018), manifiesta que una de las ventajas al usar HMA, es su rápida colonización radicular de las plantas hospederas y del suelo circundante utilizando los micelios (Jansa et al., 2013, p.05).

2.2.5. Ventajas de las micorrizas en los agroecosistemas

En diferentes habitas y sistemas agrícolas, los HMA, tienen mucha relevancia porque a través del mutualismo los vegetales obtienen nutrientes y minerales del suelo, mejorando su resistencia al estrés biótico y abiótico, disminuye la disputa entre plantas llevando el

carbono por las hifas extraradical (Simard y Durall, 2004, p.08), modificando la diversificación y el rendimiento de los vegetales. Al ser un proceso mutualista entre plantas y hongos, se debe comprender el rol de las comunidades de plantas en su forma y distintas comunidades de HFMA (Burrows y Pflieger, 2002, p.120).

2.2.6. Factores que afectan la colonización de micorrizas en campo

Kernaghan, (2005), Sostiene que los aspectos bióticos y abióticos inciden para crear comunidades de HMA, la distribución de comunidades vegetales es crítico por su preferencia de los HMA los componentes que determinan la relación planta-hongo, incentivo de la producción de esporas, hifas, flavonoides, strigolactona, auxinas, son liberadas por raíces de las plantas para determinar la prioridad planta-hongo (Akiyama et al., 2005, p.824).

Weller, (2002), manifiesta que los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) generan una glicoproteína denominada glomalina (GRSP). Esta molécula, de características recalcitrantes, tiene como funciones consolidar los conglomerados del suelo, estabilidad y como depósito de carbono y nitrógeno del suelo. Altas concentraciones de glomalina han sido relacionadas con la formación de conglomerados del suelo en especial en los sistemas de manejo conservacionistas. La glomalina permanece en el suelo en promedio de 7 a 42 años dependiendo de las características ambientales, ecosistémicas, manejo agrícola de los suelos.

También Rillig et al. (2003), manifiesta que la glomalina es un indicador de impactos del cambio de uso la tierra. Pero el incremento de HMA, y de glomalina, se limita en terrenos con elevada disposición de P y prácticas agrícolas como: fumigación, abonamiento y utilización de plaguicidas. Estas prácticas dañan de manera negativa en la colonización y su función de los HMA. Esto indica que el incremento de glomalina será disminuida bajo estas circunstancias. Indicando que el incremento de glomalina estaría relacionado con la mejora de agregados del suelo.

2.2.7. Almacenamiento de carbono en ecosistemas tropicales

Muchas actividades forestales, agrícolas, forestación de ecosistemas silvícolas y la agrosilvicultura reducen en parte las emisiones del dióxido de carbono, mediante la acumulación del carbono en lugares de extensa duración (José y Bardhan, 2012, p.86). Estos lugares contienen organismos microscópicos del suelo, biomasa aérea, subterránea y carbono orgánico e inorgánico relativamente estable; y están en constante variación por

procesos naturales y antropogénicas. En 1997 con la aceptación de Protocolo de Kioto, la agrosilvicultura es una actividad viable para acumular carbono en paisajes agrícolas y así disminuir los efectos nocivos del cambio climático (José y Bardhan, 2012, p.86).

3.2.8. Almacenamiento de carbono en ecosistemas con café

En un estudio comparativo de dos tipos de cafetales, uno de monocultivo y otro con un sistema agroforestal (AF) que incluía la especie *Inga densiflora*, se encontraron notables diferencias en las reservas de carbono; el monocultivo de café reportó $9,8 \pm 0,4 \text{ Mg ha}^{-1}$, mientras que en el sistema agroforestal alcanzó $25,2 \pm 0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$. En tanto que Hager (2012) en Costa Rica, encontró en las fincas cafeteras agroforestales una reserva de carbono de $93 \pm 29 \text{ Mg ha}^{-1}$. Los cafetales agroforestales que contaban con sombra proporcionada por especies arbóreas introducidas, como *Pinus spp.*, y *Eucalyptus spp.*, superaban en almacenamiento de carbono a aquellos que tenían sombra de *Inga* (Ehrenbergerová et al., 2016, p. 10). El acopio de carbono en la biomasa y en el suelo hasta una profundidad de 0.70 m, se determinó que los cafetales a cielo abierto presentaban un promedio de $148.34 \text{ Mg ha}^{-1}$, mientras que aquellos con agroforestería alcanzaban un promedio de 195.6 Mg ha^{-1} . Es importante destacar que la producción promedio de café en el sistema agroforestal se mantuvo en niveles similares a la del cultivo a cielo abierto, con la ventaja adicional de ingresos adicionales derivados de la explotación de los árboles de caucho (Hergoulach et al., 2012).

2.3. Definición de términos básicos

Bonos de carbono en Perú. El Perú, está comprometido con la reducción de los GEI; por lo que ha planteado una sucesión de procesos económicos y de mercado (Bonos de carbono) para retener el CO_2 (Phillips et al., 2017, p.12).

Carbono orgánico. El carbono orgánico es el elemento fundamental ubicados en el sistema suelo, atmósfera, océanos, suelo y subsuelo, conjuntamente determinan la reserva de carbono (Huamán-Carrión et al., 2021, p.85).

Carbono en ecosistemas forestales. La mitad del carbono almacenado en los vegetales boscosos se encuentra en el sistema suelos; sin embargo, este valor varía según la edad de los bosques y la biomasa presente. Pan et al. (2011), indicó que 32% de C se encuentra en el suelo.

Cambio climático. Se refiere a una alteración en las condiciones climáticas, ya sea debido a factores naturales o a la influencia directa de la actividad humana, según lo establecido

por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. (CMNUCC, 1999).

Carbón orgánico. Molécula de carbono unida a un compuesto orgánico, que está correlacionado a diversos factores, entre ellos tenemos la mineralización de la materia orgánica y biomasa microbiana (Gianfreda y Bollag, 1996, p.123).

Glomalina. Es una proteína fúngica estable, GRSP parece desempeñar un papel esencial como agente aglutinante del suelo a largo plazo para formar agregados (Adame et al., 2012, p.03).

Hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Los (HMA) establecen simbiosis con vegetales terrestres en aproximadamente 80%; formando arbusculos, vesículas (en ciertas especies) e hifas en el interior de las células corticales de vegetales que están siendo colonizadas.

Micorrización. Es una técnica biológica que se utilizan en numerosos cultivos (Noda, 2009, p.06).

Perfil de suelo

Sección vertical del suelo que describen y analizan los edafólogos para clasificarlo (Juan, 2008).

Suelo y carbono. Los suelos almacenan carbono entre 1500 y 2000 Pg (Janzen, 2004, p.349), con porcentajes que van desde 45 hasta 55 %.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito y condiciones de la investigación

3.1.1. Lugares de estudio

a) Sistemas agroforestales con café

- Departamento: San Martín
- Provincia: Lamas
- Distrito: Tabalosos

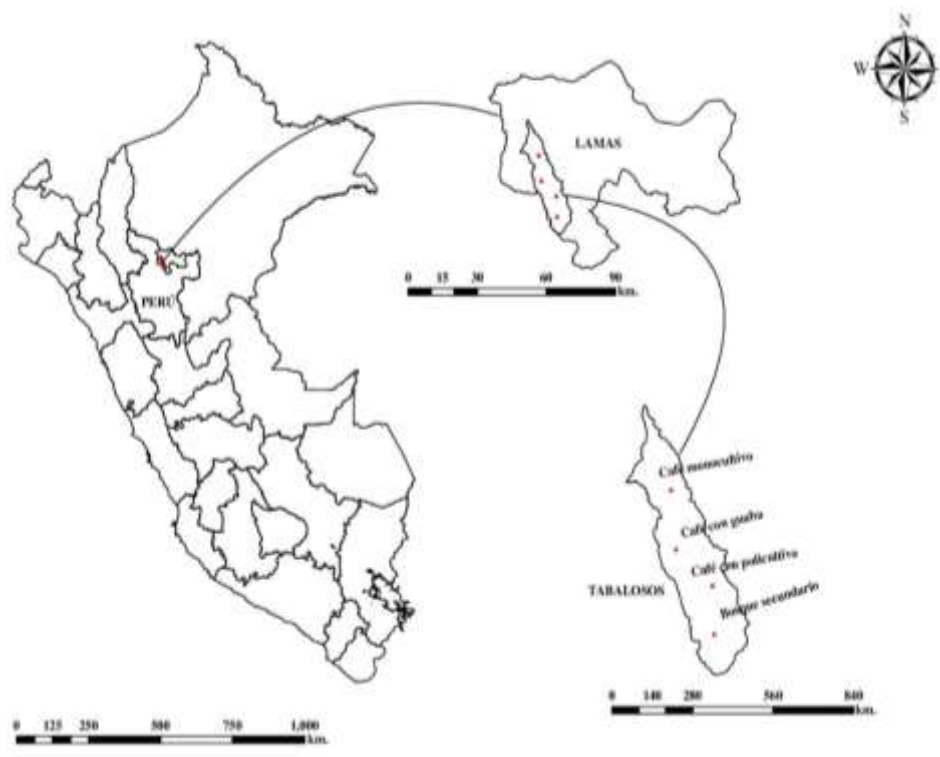


Figura 1

Ubicación Geográfica del área de estudio

Fuente: sacado de web

b) Laboratorio donde se realizó el experimento

- Departamento: San Martín.
- Provincia: San Martín.
- Distrito: Tarapoto.
- Laboratorio: Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales, UNSM.
- Coordenada referencial: 18M 9282753; UTM 0347414.

3.1.2. Periodo de ejecución

La presente investigación se ejecutó entre junio de 2022 a marzo de 2023.

3.1.3. Autorizaciones y permisos

No aplica

3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad

El estudio en cuestión no alteró ni afectó el medio ambiente; por lo tanto, no requirió de un control ambiental.

3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales

Se acató la normatividad de redacción y contenidos indicando las citas y referencias respectivas; para la cual se siguió el reglamento de ciencia y tecnología de la UNSM.

3.2. Sistema de variables

3.2.1 Variables principales

a) Variables independientes

- Tipo de vegetación: Café como monocultivo, café con guaba, café como policultivo y bosque secundario.
- Profundidad de suelo: 0-15 y 15-30 cm

b) Variables dependientes

- Contenido de glomalina.
- Carbono en suelos.
- Carbono en el subsuelo.
- Carbono subterráneo.
- Colonización micorrízica
- Conto de esporas
- Limo
- pH

3.2.2 Variables secundarias

Condiciones climáticas (Temperatura, humedad, precipitación, etc).

- Tiempo de transporte de los suelos para los análisis de glomalina desde los lugares de origen.

3.3. Procedimientos de la investigación

3.3.1. Determinar la correlación del almacenamiento de carbono presente en el suelo con la colonización y la población de micorrizas arbusculares en fincas de café y bosque secundario en Lamas, San Martín.

a) Determinación de carbono en suelos

Se consideró tres parcelas distribuidas en fincas de café y una parcela en un bosque secundario aledaño a las fincas café. Cada parcela consistía de 2 has aproximadamente y a la vez contenía 3 subparcelas de 500 m²; haciendo un total de 12 subparcelas estratificada de acuerdo a los tipos de cobertura vegetal. De las cuales se tomó un punto georreferencial de cada tipo de cobertura vegetal (Tabla 1, Figura 2).

Tabla 1

Característica geográficas de los cuatro tipos de cobertura vegetal empleados en el estudio

Tipo de vegetación	Altura (msnm)	Distrito	18M	UTM
Café monocultivo Tabalosos (CM)	772	Tabalosos	316266	9294182
Café guaba Tabalosos (CG)	783	Tabalosos	316254	9294757
Café policultivo Tabalosos (CP)	704	Tabalosos	316277	9294775
Bosque secundario (BS)	769	Tabalosos	316329	9294302



Figura 2

Selección de diferentes coberturas vegetales para el estudio

Fuente: Toma fotográfica

Nota: A. fincas de cafés seleccionados. B. Georreferenciación de sitios con diferente cobertura vegetal.

Se aperturaron 12 calicatas (una por parcela), de los cuales se tomaron muestras de suelo a dos profundidades (0 a 15 cm y de 15 a 30 cm), abarcando en su mayoría las raíces finas del cultivo (diámetro > 2 mm), con alto contenido de materia orgánica producto del deterioro de las mismas (Andrade et al. 2008, p.14).



Figura 3

Apertura de calicatas para toma de muestras.

Fuente: Toma fotográfica.

Nota: A. Aplicación de cuadrantes para elaboración de calicatas y B. Apertura de calicatas.

Se estimó los niveles de CO utilizándola la metodología de Walkley, Black (1934), en el Laboratorio de nutrición y fertilización de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM – Lima.

Se empleó la metodología planteada por Andrade y Ibrahim (2003), para obtener el COS a partir del porcentaje de carbono orgánico y la densidad aparente.

El COS se logró mediante la siguiente ecuación: $CS (Tn/ha) = (PVs \times \% C) / 100$

Donde:

CS = Carbono en el suelo (t/ha)

PVs = Peso del volumen del suelo

% C = Resultados de carbono en porcentaje analizados en laboratorio

100 = Factor de conversión

La densidad aparente (DA) se determinó usando un cilindro de metal de 114.55 cm³ de volumen (Andrade y Ibrahim, 2003, p.110.), a distintas profundidades entre 0-30 cm (realizadas en los tres primeros horizontes). Estas muestras fueron secados en horno a una temperatura de 70 °C por 36 horas en el Laboratorio de cultivo de tejidos vegetales (LCTV) de la Universidad Nacional de San Martín. De cada subparcela se tomaron tres muestras y DA se calculó mediante la ecuación:

$$Da = Pss / Vc$$

Donde:

Da = Densidad aparente (g. cm⁻³)

Vc = Volumen del cilindro (cm³)

Pss = Peso seco del suelo (gr)



Figura 4

Toma de muestras para determinación de densidad aparente del suelo

Fuente: Toma fotográfica.

b) Determinación de la colonización micorrízica

Se tomaron muestras de raíces pequeñas (secundarias y terciarias) tomadas de los diferentes tipos de cobertura vegetal siendo este café como monocultivo (CM), café con guaba (CG), café como policultivo (CP) y bosque secundario (BS). Para la tinción de raíces se usó el método propuesto por (Phillips y Hayman, 1970, p.158).



Figura 5

Muestreo de suelos para determinación de la colonización micorrízica.

Fuente: Toma fotográfica.

Nota: A. Limpieza alrededor de las plantas de café y B. Colecta de suelo rizosférico en fincas de café.

De las raíces almacenadas se emplearon 20 unidades seleccionadas con características deseables de buena textura con 1.5 cm de longitud; estas fueron depositados en láminas porta objeto (10 raíces por cada campo) debidamente ampliado y organizado de forma lógica para la medición microscópica.

El procedimiento para calcular el porcentaje colonización se llevó a cabo mediante el método de (Brundrett et al., 1996), que consiste en poner un segmento de raíz en la mira del microscopio dividido en tres zonas de análisis (superior, intermedio e inferior) (Figura 6). Cada una de estas zonas fue minuciosamente examinada, luego se anotó cuidadosamente la presencia o ausencia de estructuras micorrízicas (vesículas, arbuscúlos e hifas). Estos registros se llevaron a cabo para los 20 segmentos que se montaron en la lámina portaobjeto como parte del procedimiento de análisis. (Figura 7).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
✓	□	□	□	□	□	□	x	□	□	□	□	x	□	□	□	□	□	□	□
□	x	□	□	x	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	x	□	□	X	□
□	□	□	□	□	□	x	□	□	x	□	x	□	□	□	□	□	□	□	□

Figura 6

Evaluación de la colonización micorrízica.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Lámina con 20 segmentos de raíces: x=Ausencia; ✓=Presencia

Para sacar el valor numérico de la colonización de micorrizas de raíces de plantas trampa se utilizó la fórmula matemática adjunta.

$$\% \text{ Colonización micorrízica} = \frac{\text{Nº de segmentos colonizados}}{\text{Nº total de segmentos evaluados}} \times 100$$

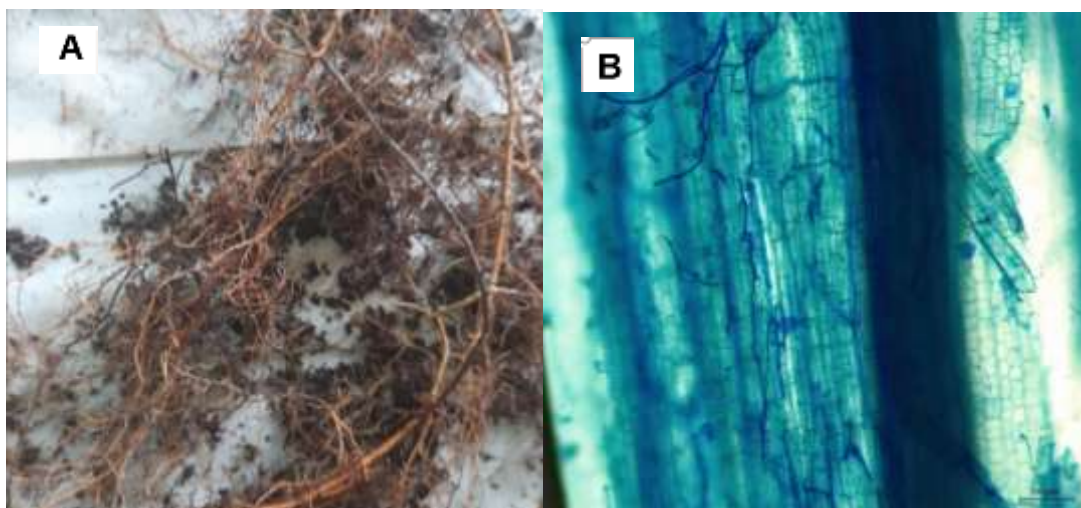


Figura 7

Colonización micorrízica de raíces de café y especies agroforestales.

Fuente: Toma fotográfica.

Nota. (A) Raicillas de especies agroforestales para el lavado y (B) Observación de la micorrización en raíces lavadas y teñidas.

c) Determinación de la población micorrízica

Se evaluó a partir de las muestras de suelo colectados en cada cobertura vegetal en Lamas, San Martín, aplicando lo propuesto por (León, 2006), mediante el tamizado húmedo y decantación según el método descrito por (Gerdemann y Nicolson, 1963, p.236), y solución de sacarosa (Jenkins, 1964); Se prepararon soluciones de azúcar al 20 % y al 60 %, las cuales se enfriaron durante una hora hasta formar dos interfaces en el tubo de falcón. En una placa Petri, se colocaron 20 gramos de muestra de suelo, y se humedeció con gua completamente. Luego se transfirió a un envase de 5 litros y se agregó agua hasta cubrir el 80 %, luego se agitó durante 30 segundos y después se hizo reposa por 30 segundos, y se procedió a verter los sobrenadantes en tamices de 250 y 38 micrómetros, repitiendo este proceso cinco veces. Finalmente, se agregó 10 ml de solución azucarada al 20 % y luego 20 ml de solución al 60 %.

Luego se centrifugó la mezcla a 3500 rpm durante 5 min con la finalidad de suspender las esporas en la interfaz. Luego, se retiró los tubos y el contenido sobrenadante se pasó a través de un tamiz de 38 μm , seguidamente se lavó con agua corriente hasta quitar los residuos de sacarosa, dejando las esporas libres. Posteriormente las esporas se transfirieron a una placa Petri delimitada 1 cm. Finalmente, se procedió a la observación de las esporas utilizando un microscopio estereoscópico con un aumento de 2X (Figura 8).

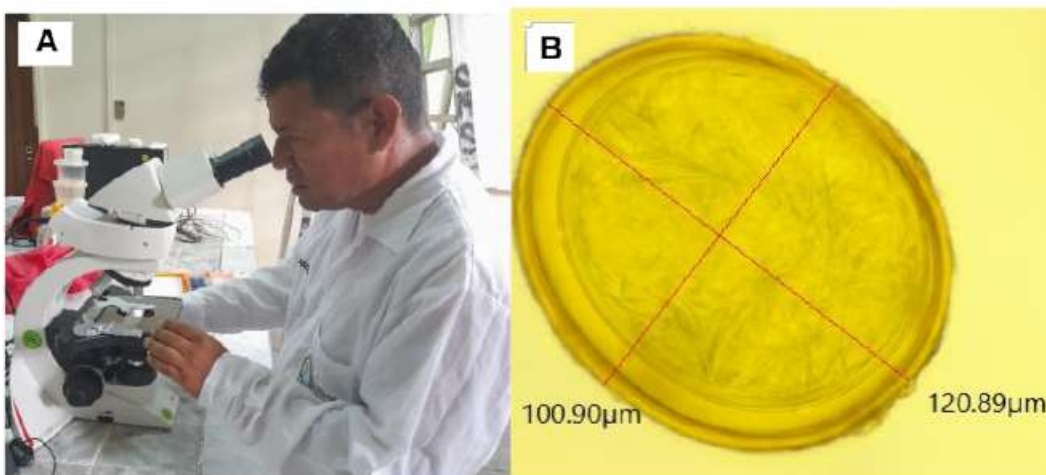


Figura 8

Determinación de la población micorrízica.

Fuente: Toma fotográfica.

Nota: A. Observación de muestras preparadas en el microscopio y B. Esporas de micorrizas arbusculares observadas

3.3.2. Determinar la correlación del almacenamiento de carbono presente en el suelo con el contenido de glomalina en fincas de café y bosque secundario en Lamas, San Martín.

a) Extracción y cuantificación de glomalina y catalasa en suelos micorrizados.

Estos análisis fueron realizados en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Para lo cual se recolectaron muestras representativas de suelo de cuatro coberturas vegetales, las cuales fueron tamizadas con zaranda de 2 mm de espesor y luego se mantuvieron húmedo a °C antes de ser procesados; Según (Sieverding, 2008).

b) Glomalina total (GT)

Los análisis se realizaron en el laboratorio de la UNALM. Se utilizó tubos de vidrio de 30 ml, al que se añadió 1 g. de suelo y 8 ml. de citrato de sodio 50 Mm, pH 8,0. se mezcló y se introdujo en la autoclave a 121 °C y 15 lb de presión/pulg² por espacio de una hora, después de enfriar el sobrenadante se almacenó a 4 °C, luego se utilizó el suelo restante del fondo del tubo centrifugado, para volver a realizar el proceso de extracción hasta que el sobrenadante tome un color dorado, café o rojizo muy transparente, con una media de 6 a 7 extracciones; después de determinar el volumen del sobrenadante se empleó una fracción para realizar la lectura y luego se almacenó de nuevo a 4 °C. Se utilizó la metodología de Bradford (1976) para proteínas, recomendado por Wright y Upadhyay (1996) y mejorado por Castillo, Rubio y Borio (2009), y citado por USDA y del INVAM.



Figura 9

Muestreo de suelos para análisis de glomalina.

Fuente: Toma fotografica.

Nota: A. Recolección de ejemplares de suelo y B. Acondicionamiento y etiquetado de muestras de suelo.

Para cuantificar el contenido de glomalina, se realizaron lecturas espectrofotométricas a 590 o 595 nm. Con el fin de minimizar errores de lectura, esto debe realizarse antes de los 5 minutos después de la adición del reactivo de Bradford.

3.3.3. Determinar la correlación del almacenamiento de carbono presente en el suelo con el contenido de limo en fincas de café y bosque secundario en Lamas, San Martín.

a) Muestreo de suelo

Para llevar a cabo el muestreo de cada cobertura vegetal se abrieron hoyos en cada compartimento vegetal: café como monocultivo, café con guaba, café como policultivo y bosque secundario; para ello se empleó la técnica de muestreo compuesto, teniendo en cuenta la Guía técnica para el muestreo de suelos del (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2014).

Al concluir el proceso, se lograron obtener un total de 8 muestras representativas, lo que significa que se obtuvo una muestra por cada uno de los tratamientos; es decir 4 muestras procedentes de cada parcela; estas se codificaron y posteriormente enviadas al laboratorio del ICT-Tarapoto.

Tabla 2*Característica físico-químico de suelos en las diferentes coberturas vegetales*

Fuente	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	CE (dS/m)	pH	MO (%)
CM	44,96	20,28	35,26	0,08	5,42	2,58
CG	26,96	23,28	49,76	0,12	7,71	2,45
CP.	28,46	18,78	38,76	0,24	4,04	4,86
BS	44,96	25,78	37,76	0,14	6,35	5,14

Fuente: ICT, 2023

3.3.4. Determinar las concentraciones de carbono en diferente compartimiento en fincas de café y bosque secundario en Lamas, San Martín.

a) Biomasa del café

Para medir la biomasa en plantas de café, estos fueron medidos con un vernier y cinta diamétrica. Para la obtención del diámetro del tronco se utilizó el vernier, mientras que para la altura total una wincha o cinta métrica.

Para el cálculo de la biomasa se realizó utilizando el modelo logarítmico, se utilizó el diámetro de 30 cm como variable independiente siguiendo la metodología descrita por Suarez (2004):

$$\text{LnB} = -2,39 + 0,95 \text{ Ln}(d) + 1,27 \text{ Ln}(h)$$

Donde:

B = Biomasa

Ln = Logaritmo natural

d = Diámetro a 15 cm sobre el suelo (cm)

h = Altura (m)

Constantes = -239; 0,95 y 1,27

b) Biomasa de árboles en pie

Se utilizó el método del ICRAF Arévalo et al. (2003), para ello se identificaron y seleccionaron puntos distantes como subparcelas de 5 x 25 m midiéndose altura y diámetro a la altura del pecho (DAP) de árboles vivos y parados muertos entre 2,5 y 30 cm de DAP. Si se bifurcase por debajo de 1,3 m, se consideró dos árboles diferentes y a la vez se tomaron dos medidas de diámetro por árbol.

Existen diversos modelos desarrollados para calcular las cantidades de biomasa arbórea, y todos ellos se basan en estimaciones indirectas, por inferencia de sus medidas biométricas (altura, DAP y densidad).

En la estimación de biomasa de árboles vivos y muertos en pie mayormente para el cálculo de carbono retenido, se sugiere el modelo de (Chave et al., 2005, p.88).

$$BA = \exp (-2,977 + \text{Ln} (\rho \times \text{DAP}^2 \times H))$$

Donde:

- BA = Biomasa arboles vivos y muertos de pie
 -2.997 = Constante
 Ln = Logaritmo natural
 DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm)
 ρ = Densidad de la madera (gr/cm^3)
 H = Altura total (m)

Para calcular la biomasa por hectárea, se sumaron las biomásas de todos los árboles medidos y registrados (BTAV) de la parcela de 5m x 25m, es decir:

$$\text{BAVT} (\text{t ha}^{-1}) = \text{BTAV} * 0.1$$

BAVT (t ha^{-1}) = biomasa de árboles vivos

BTAV = biomasa total de las parcelas de 5m x 25m

0,1= factor de conversión cuando la parcela es de 5m x 25m.



Figura 10

Evaluación de la biomasa agroforestal.

Fuente: Toma fotográfica.

Nota: A. Selección de estratos en fincas de café y B. Medida dasométrica del bosque secundario.

3.4. Análisis estadístico

Se realizó utilizando el software de programación R en su versión 4.0.2. Para estimar los factores de cobertura, profundidad, interacción, variables edáficas y micorrízicas; se realizaron comparación de pruebas de varianza y medias de Tukey a una probabilidad de error del 5 %. Además, se evaluó el coeficiente de correlación de Pearson entre el contenido COS y las variables edáficas (pH y limo) y (colonización, esporas, glomalina) así como la correlación de concentración de carbono subterráneo y el carbono sobre el suelo el suelo. En todos los escenarios, independientemente del nivel de correlación o de la significancia, se ajustó al modelo de regresión lineal.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Correlación del almacenamiento de carbono presente en el suelo con la colonización y la población de micorrizas arbusculares en fincas de café y bosque secundario.

Los valores más altos de colonización se presentaron bajo cubiertas vegetales (CM, CG, CP y BS), seguido por la profundidad del suelo fijado entre 0-15 y 15 a 30 cm con valores que van de 33,12 y 27,67 % respectivamente; mientras que el número de esporas tuvo diferencias significativas en la profundidad del suelo seguido por la cobertura vegetal con valores de 86,86 y 49,84 esporas en 100 gramos de suelo evaluado Tabla 3. De acuerdo a la prueba de Tukey Tabla 4 se encontró mayor colonización en café como monocultivo con 44,06 % entre 0 a 15 cm. y una menor colonización en bosque secundario entre 15 a 30 cm de profundidad. Un mayor número de esporas se encontró en bosque secundario en la superficie del suelo con un valor de 165 esporas por 100 gramos de suelo.

En cuanto a la correlación Figura 11 entre la colonización micorrízica y carbono orgánico del suelo se puede notar que no existe diferencias significativas; puesto que existe una correlación a la par entre ambas variables; resultados similares se observa en la correlación con el número de esporas de HMA y el carbono orgánico del suelo Figura 12.

Tabla 3

Análisis de varianza para la colonización y números de esporas evaluadas

Factores	d.f	Colonización de HMA (%)		Nº Esporas HMA	
		F	p	F	p
Cobertura	3,23	33,119	<0,001*	49,838	<0,001*
Profundidad	1,23	27,674	<0,001*	86,864	<0,001*
Cobertura*Profundidad	3,23	0,246	0,862	3,971	0,0271*

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4

Prueba de Tukey para la colonización y números de esporas evaluadas

Variable	Profundidad	Cobertura				ANOVA	
		CM	CG	CP	BS	F _{3,1}	p
Colonización	0-15	44,06a± 2,15	39,33ab ± 2,27	30,1bc ± 2,19	29,33c ± 1,95	11, 1	0,003*
	15-30	38,83a± 0,08	31,266± 2,359	23,83c ± 1,09	21,7c± 1,27	28, 8	<0,001*
Esporas	0-15	127,33b± 9,59	121bc± 7	97,33c ± 4,40	165a± 2,51	18, 8	<0,001*
	15-30	104,33ab ± 1,45	100,33b ± 1,76	61,66c ± 2,66	114a± 4,04	73, 8	<0,001*

Fuente: elaboración propia.

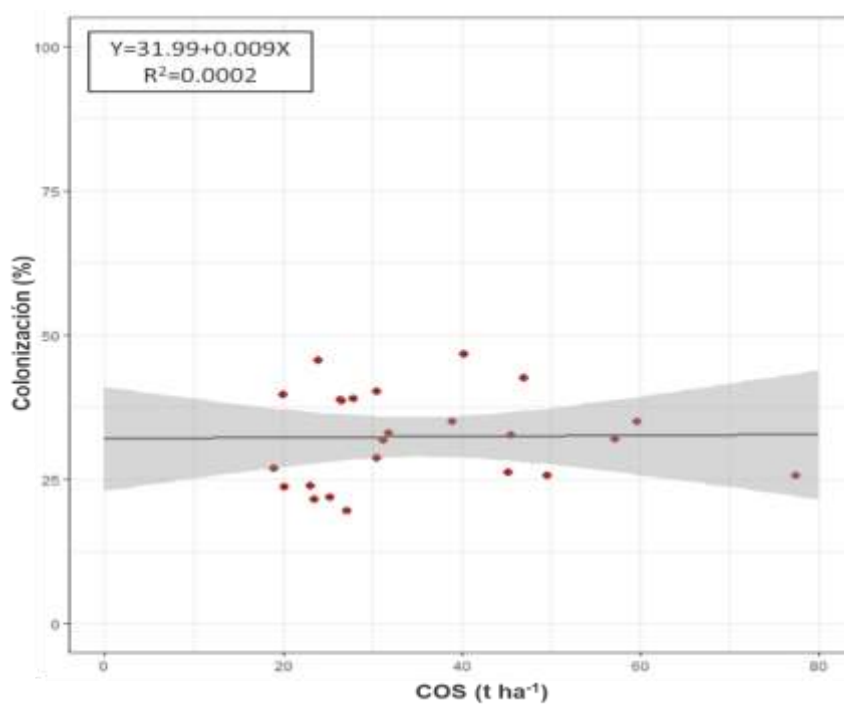


Figura 11

Correlación entre la colonización micorrízica y carbono orgánico del suelo.

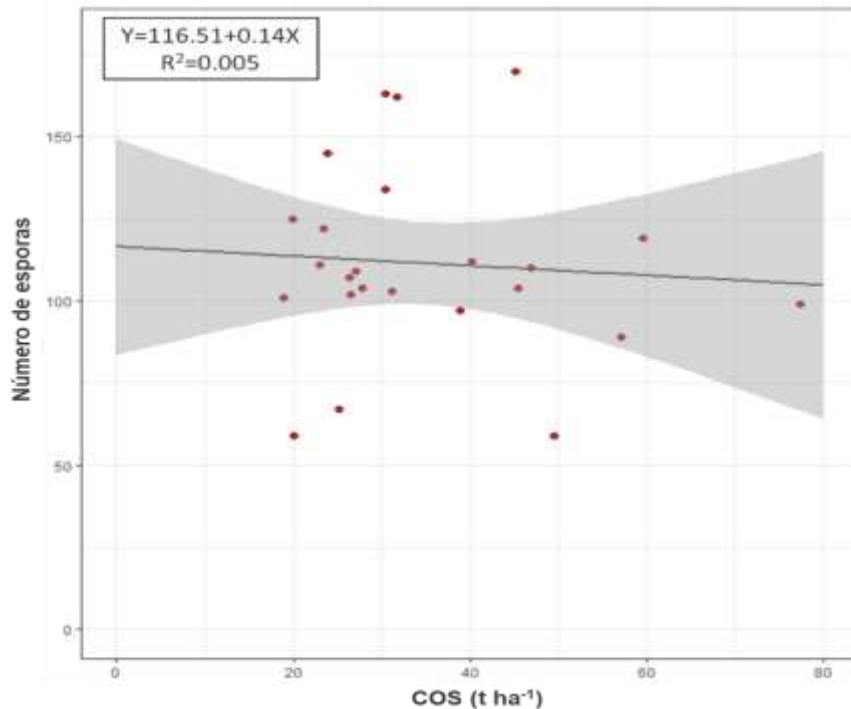


Figura 1. *Correlación entre el número de esporas de HMA y el carbono orgánico del suelo.*

Birhane et al. (2020), observó que la comunidad de plantas menos perturbada, que contenía una alta densidad de árboles y arbustos, tenía la mayor densidad de esporas de HMA, colonización de raíces y reservas de carbono en el suelo; los más perturbados que contenía la menor densidad de árboles y arbustos, sostuvo la menor densidad de esporas de HMA, colonización de raíces y reservas de carbono en el suelo. No hubo diferencia significativa en la densidad de esporas entre las dos profundidades del suelo, pero la colonización de raíces por HMA fue significativamente mayor en la parte superior del suelo y menor en el subsuelo.

La densidad de esporas en las regiones tropicales depende en gran medida del tipo de vegetación, como lo respaldan nuestros resultados. Zhao et al. (2001), encontró que la densidad de esporas varió de 50 a 1908 en 100 g^{-1} de suelo seco en tres tipos de bosques (es decir, bosques primarios, secundarios y de piedra caliza) en las ecorregiones tropicales del suroeste de China. Del mismo modo, Birhane et al. (2010), encontraron hasta 69 esporas en 100 g^{-1} de suelo seco en bosques caducifolios secos. Además del impacto de la perturbación, la menor densidad de esporas también puede deberse a pérdidas de plantas hospedantes. Esto puede atribuirse a la pérdida de plantas pioneras, muchas de las cuales sirven como plantas hospedantes primarias (Aynekulu et al., 2011, p.501; Sarkar et al, 2014, p.1083), pero también a la fenología y la estacionalidad de las asociaciones vegetales.

La función de las diferentes especies de HMA en los ecosistemas aún se desconoce y necesita más investigación, pero se supone que una gran diversidad de especies de HMA probablemente sea más beneficiosa para una comunidad vegetal (Sarkar et al., 2014, p.1083). Las comunidades con mayor densidad de plantas aumentan la colonización de raíces. La cubierta vegetal denso también produce una mayor caída de hojarasca y más biomasa de raíces para mantener una comunidad diversa de HMA. La densidad de plantas está directamente asociada con la diversidad de HMA, ya que la rizosfera del árbol maduro tiene un alto porcentaje de esporas. Boddington y Dodd (2000), informaron que la disponibilidad y la actividad de HMA pueden verse afectadas por la eliminación de la vegetación, lo que reduce significativamente la densidad de esporas y la colonización de raíces de HMA. No encontramos diferencias en la densidad de esporas entre las profundidades del suelo, en consonancia con (Birhane et al., 2010, p.2164).

La composición de HMA cambió con la profundidad del suelo y la densidad de esporas se vio disminuido con el incremento de la profundidad del suelo, lo que corrobora los resultados anteriores (Shukla et al., 2013, p.27; Cuenca et al., 2010, p.59), la baja disponibilidad de oxígeno en las zonas más profundas del suelo puede reducir la densidad de esporas (Brady y Weil 1996; Verma et al., 2010). La densidad de esporas y la colonización de raíces por HMA fue mayor en la capa superficial del suelo (0–15 cm) que, en el subsuelo, lo que sugiere una mayor actividad biológica en esta zona del perfil del suelo. Esto podría deberse a su proximidad a la capa de hojarasca en la superficie del suelo debajo de diferentes capas de dosel, con diferencias entre las comunidades que reflejan diferentes tasas de producción de biomasa y un microclima más propicio en las comunidades con mejor vegetación (Adugna et al., 2015, p.3530).

Se ha demostrado previamente que el cambio el uso del suelo disminuye la densidad de esporas de HMA y la colonización de raíces (Oehl et al., 2005, p.274), debido a la ruptura de la red de hifas de HMA en el proceso de cultivo y pastoreo, lo que conduce a una reducción en la colonización de micorrizas de la raíz (Mohammad et al., 2003, p.413), Los suelos formados bajo bosques tienden a almacenar niveles altos de CO en la parte superficial y menores cantidades el subsuelo (Yohannes y Webb, 1999, p.28; Girmay et al. 2008, p.356), Por lo tanto, es probable que la actividad de HMA sea un factor importante en la regulación del ciclo de nutrientes en los ecosistemas (Abbott y Robson, 1991, p.128). La relación entre la densidad de esporas y la colonización de las raíces en suelos con diferentes características, es producto de la interacción entre ellas, pudiendo llegar a ser específica para cada caso (Sivakumar, 2013, p.159). Las variaciones en el pH del suelo pueden alterar la concentración de muchos nutrientes e iones tóxicos en el suelo y, por lo

tanto, afectar el desarrollo y la función de los HMA. En este estudio, sin embargo, tanto la densidad de esporas de HMA y la colonización de raíces, se encontró una correlación negativa con el pH del suelo, lo que podría dificultar la germinación de esporas y la colonización de raíces (An et al., 2008, p.519).

4.2. Correlación del almacenamiento de carbono presente en el suelo con el contenido de glomalina en fincas de café y bosque secundario

Según el estudio de varianza Tabla 5, respecto al contenido de glomalina, se muestran diferencias significativas tanto en la cobertura vegetal empleada (CM, CG, CP y BS) como en ambas profundidades de suelo (0-15 y 15 a 30 cm), sin embargo, la interacción de ambos factores no muestra diferencias significativas para la variable contenido de glomalina. En cuanto a la prueba de Tukey Tabla 6, existe diferencias significativas tanto en las diferentes coberturas vegetales como en las profundidades de suelo. El sistema de café como monocultivo a una profundidad superficial presentó mayor contenido de glomalina; esto probablemente por el mayor volumen de raíz que presentan las plantas de café con un promedio de 18,47 mg/g; mientras que el menor contenido lo presentó el sistema de café como policultivo con un valor promedio de 4,10 mg/g de suelo.

En cuanto a la correlación Figura 13, entre el contenido de glomalina y el carbono orgánico del suelo, se puede notar que cuando se incrementa la concentración de carbono también se incrementa el contenido de glomalina.

Tabla 5

Análisis de varianza para el análisis de glomalina

Factores	d.f	Glomalina (mg/g)	
		F	p
Cobertura	3,23	9,520	<0,001*
Profundidad	1,23	28,989	<0,001*
Cobertura*Profundidad	3,23	1,946	0,162

Tabla 6

Prueba de Tukey para la glomalina evaluada en muestras de suelo

Variable	Profundidad	Cobertura				ANOVA	
		CM	CG	CP	BS	F _{3,11}	p
Glomalina	0-15	18,467a± 3,402	13,575ab± 0,223	12,766ab 2,283	7,066b± 0,488	5,111	0,028*
	15-30	10,171a± 0,743	8,01ab± 0,280	4,103b± 1,567	5,232b± 0,547		

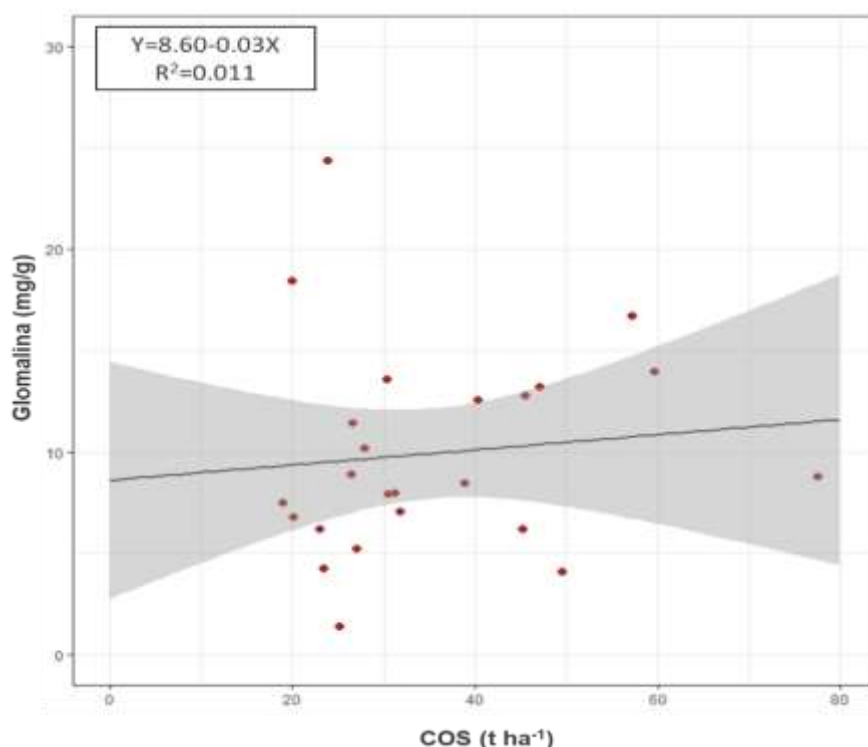


Figura 13. *Correlación entre la glomalina de suelos y el carbono orgánico de suelos.*

Uno de nuestros principales hallazgos fue que la proteína del suelo relacionada con la glomalina (GRSP) fue más importante en el secuestro de C del suelo subterráneo que en el secuestro de C del suelo superficial. Nuestros datos muestran claramente que GRSP disminuyó linealmente desde la capa de suelo de 0 a 20 cm hasta la capa de 80 a 100 cm, pero su contribución al depósito de carbono orgánico del suelo (COS) fue ~ 1,2 veces mayor en las capas más profundas (40 a 100 cm) que en la superficie del suelo (0–40 cm). Wang et al. (2020), hallazgos similares se han encontrado en otros estudios. Por ejemplo, las tierras de cultivo en el noreste de China tenían niveles más bajos de GRSP en los suelos profundos que en los suelos superficiales, pero entre un 34 y un 50 % más de GRSP/SOC en los suelos profundos (Wang et al., 2017, p.2-4). Nuestros hallazgos (mayor

contribución de GRSP-C al SOC con una mayor profundidad de muestreo) proporcionan nueva evidencia de que el C derivado de microbios mejora el secuestro de SOC en capas profundas del suelo (Zhang et al., 2015, p.144). La mayor aportación de GRSP al secuestro de COS, es que puede aumentar la estabilidad del COS en capas profundas del suelo, debido a la mayor estabilidad de GRSP observada en diferentes estudios

La glomalina de las tierras agrícolas está regulada por los nutrientes del suelo (principalmente SOC y N) en suelos superficiales, mientras que las propiedades fisicoquímicas (p. ej., el pH) regulan la glomalina en los suelos profundos (Wang et al., 2017, p.4), lo que indica que la regulación de GRSP por las propiedades del suelo dependen de la vegetación sobre el suelo. A diferencia de los cultivos de raíces poco profundas, la forestación hace que se desarrolle un sumidero de C importante en las capas profundas del suelo (Jobbágy y Jackson 2000; Harrison et al. 2011), por lo que se deben incluir diferentes respuestas de glomalina a los nutrientes del suelo en las capas verticales. Estudios de secuestro de COS. indica que se acumulaba mucha menos glomalina en los suelos profundos, mientras que su contribución al COS y a los nutrientes en los suelos profundos era de 1,1 a 1,3 veces mayor que en los suelos superficiales, lo que demuestra la importancia del carbono y los nutrientes relacionados con la glomalina. en los suelos profundos en comparación con los de los suelos superficiales (Wang et al., 2017, p.4).

Estudios previos también encontraron 3,1–3,3 veces más glomalina en los suelos superficiales, en comparación con los suelos profundos en las zonas de agricultura y pastoreo (He et al., (2011). En un perfil de suelo poco profundo de 40 cm, la glomalina del suelo muestra un patrón de distribución vertical obvio, que disminuye con el aumento de la profundidad del suelo, y la glomalina del suelo está significativamente relacionada directamente con el fósforo y la proteasa disponibles en el suelo (Tang et al., 2009, p.1139). La contribución de la glomalina para disolver el carbono orgánico difirió en los usos de la tierra y la estacionalidad en los trópicos secos, y la proporción de glomalina-C para disolver el carbono orgánico fue menor en los bosques que en las tierras en barbecho y las tierras agrícolas (Singh et al., 2017, p.296).

Gispert et al. (2013), Manifiestan que los métodos de cultivos utilizados y las prácticas de manejo de la tierra tienen un impacto negativo en la producción de glomalina. La labranza es otro factor que inhibe la producción de glomalina, ya que deteriora el hábitat de los microbios reduciendo el desarrollo de los HMA (Dai et al., 2015); otras investigaciones también indican que la rotación de cultivos y la gestión adecuada de residuos hacen que se incremente de manera significativa el nivel de glomalina en el suelo (Singh et al., 2018,

p.299; Zhao et al., 2015, p.627). La agregación del suelo y carbono (C) asociado a los agregados desempeñan una función esencial en la salud del suelo y el secuestro de C. Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) se consideran agregados primarios del suelo debido al efecto combinado de las hifas extrarradicales y las proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (GRSP) (Yang et al., 2022, p.3).

4.3. Correlación del almacenamiento de carbono presente en el suelo con el contenido de pH y limo en fincas de café y bosque secundario.

Según el análisis de varianza en la Tabla 7, referente al contenido de pH, limo y carbono, se muestran diferencias significativas tanto en la cobertura vegetal empleada (CM, CG, CP y BS) como en las dos profundidades del suelo (0-15 y 15-30 cm); siendo el pH y el limo significativamente mediada por la cobertura; mientras que el contenido carbono orgánico del suelo mediado por la profundidad. No existiendo diferencias significativas entre la combinación de ambos factores (Cobertura * Profundidad).

La prueba de Tukey en la Tabla 8 muestra la existencia de diferencias significativas en las diferentes coberturas vegetales y profundidades del suelo para las variables de pH, limo y carbono. El sistema café como policultivo a una profundidad superficial presentó mayor pH con una media de 6,75; en tanto el menor contenido lo presentó el sistema de café como monocultivo con un valor promedio de 5,42. Respecto al contenido de limo el café con guaba presentó el mayor contenido con 23.28 %; mientras que mayor contenido de carbono hubo en café con policultivo entre 0-15 cm de profundidad.

En cuanto a la correlación en la Figura 14 entre el pH y carbono orgánico del suelo se puede notar que a medida que se incrementa el pH aumenta la concentración de carbono; similar tendencia sigue en la Figura 15 a mayor contenido de limo existen mayor concentración de carbono en los suelos evaluados.

Tabla 7*Análisis de varianza para el contenido de pH, limo y carbono orgánico del suelo*

Factores	d.f	pH		Limo		COS	
		F	p	F	p	F	p
Cobertura	3,23	7,633	0,002*	15,087	<0,001*	3,215	0,051
Profundidad	1,23	1,291	0,272	1,173	0,294	9,581	0,006*
Cobertura*Profundidad	3,23	0,219	0,881	1,521	0,247	1,524	0,246

Tabla 8*Prueba de Tukey para el pH, limo y carbono orgánico del suelo*

Variable	Factor Profundidad	Cobertura				ANOVA	
		CM	CG	CP	BS	F _{3,11}	p
pH	0-15	5,42c± 0,063	5,715bc± 0,014	6,75a± 0,369	6,345ab± 0,135	9,095	0,005*
	15-30	5,385a± 0,031	5,585a± 0,025	6,486a± 0,626	5,89a± 0,225		2,0764
Limo	0-15	20,28ab± 1,732	23,28a± 1,732	18,78ab± 0,866	15,78b± 0,866	5,2	0,027*
	15-30	18,78a± 0,866	23,28a± 1,732	20,28a± 1,732	11,28b± 1,732		10,692
COS	0-15	28,0175a± 6,213	45,667a± 8,475	60,020a± 9,338	35,800a± 4,675	3,4717	0,07
	15-30	26,931a± 0,456	29,650a± 5,828	31,570a± 9,089	24,450a± 1,281		0,3278

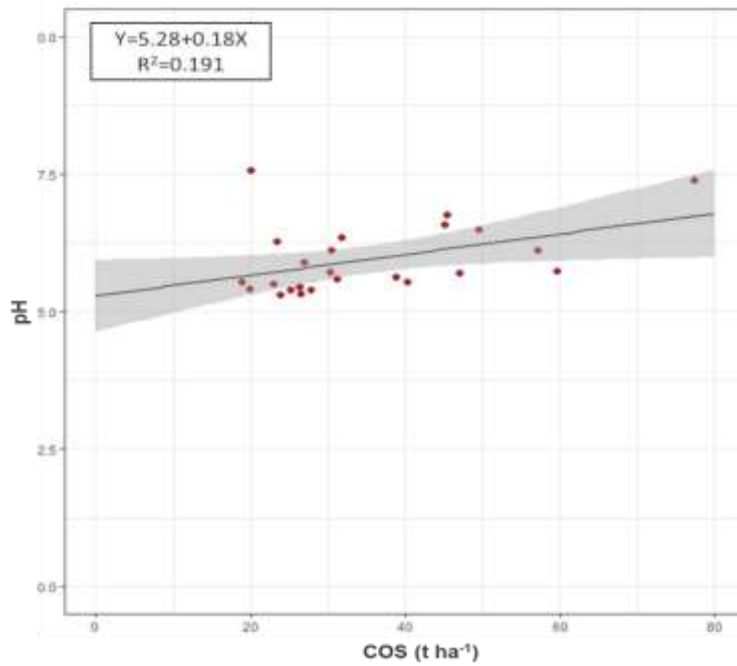


Figura 14

Correlación entre el pH del suelo y el carbono orgánico de los suelos con diferente cobertura vegetal.

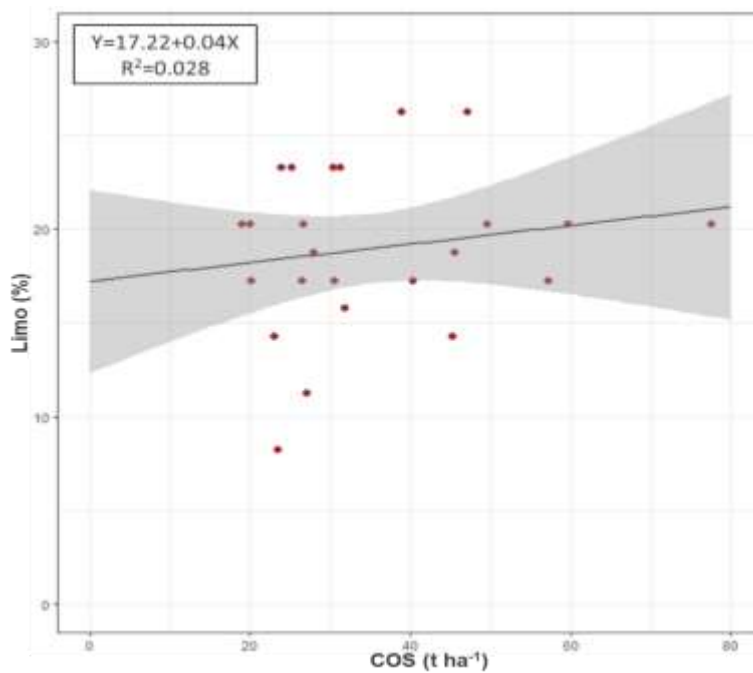


Figura 15

Correlación entre el limo del suelo y el carbono orgánico de los suelos con diferente cobertura vegetal.

Nuestra investigación arrojó luz sobre los efectos significativos del pH del suelo en la estabilización del COS, como también su importante papel y la influencia positiva del Al en

la absorción de COS por los suelos forestales. Nuestros hallazgos brindan información nueva y significativa al presentar que la sorción de COS derivada de la hojarasca depende tanto del pH del suelo como de la composición química de la hojarasca (Dawid y Pioter, 2022, p.3).

Gruba y Socha (2019), mostraron una mayor acumulación de C total en la capa de 0 a 10 cm de la capa superior del suelo mineral a pH por debajo de 4,0 y por encima de aprox. pH 6,0; realizó una prueba de correlación biviariada, entre limo grueso y existencias de COS, para mostrar la relación entre el limo grueso y la acumulación de COS; los resultados mostraron una correlación marginal significativa de limo grueso con existencias de COS ($p < 0,05$). El aumento del contenido de limo grueso tendería a aumentar relativamente las existencias de SOC. Por ejemplo, bajo matorrales densos de encinas y coscojas, se observó un valor medio de 121 t ha^{-1} para reservas de COS por debajo del 41,3% de contenido de limo grueso, mientras que bajo bosques de pino carrasco y eucalipto se registró el valor más bajo de reservas de COS con solo 38 t ha^{-1} y un porcentaje promedio de limo grueso de 14.6% (Merabtene et al., 2021, p.6).

La textura del suelo influye en la acumulación de carbono orgánico debido a la protección física de la MOS inducida por la agregación de partículas finas, como arcilla y limo fino (Jobbágy y Jackson, 2001, p.430). Estudios previos mostraron que los suelos de los bosques con altos contenidos de limo que van desde agregados finos a gruesos son esenciales para la estabilización del OC (Balesdent et al., 1998, p.52). Las fracciones de arenas y limos gruesos que van desde 20 a $2000 \mu\text{m}$ tienen el potencial de asociar desechos vegetales en varias etapas de descomposición (Schulten et al., 1993, p.679). Los suelos forestales contienen cantidades particularmente grandes de MOS asociada con la fracción de suelo más gruesa (Martí-Roura et al., 2019, p.107).

4.4. Concentraciones de carbono en diferente compartimento en fincas de café y bosque secundario

La prueba de Tukey Figura 16 muestra que existe diferencias significativas del contenido de carbono en dos compartimentos agroforestal; para todos los tipos de cobertura (CM, CG, CP y BS), mostrándose mayor concentración de carbono sobre el suelo en bosque secundario, conformado por especies forestales de shimbillo, cetico, pino chuncho y guaba con un valor superior a 70 t ha^{-1} ; asimismo, mayor contenido de carbono subterráneo se observa en la misma cobertura vegetal estudiado con $10,67 \text{ t ha}^{-1}$.

Las concentraciones más bajas de carbono se obtuvieron en fincas de café como monocultivo, sin la presencia de árboles de sombra sobre el suelo con $0,58 \text{ t ha}^{-1}$ y debajo del suelo con $0,21 \text{ t ha}^{-1}$.

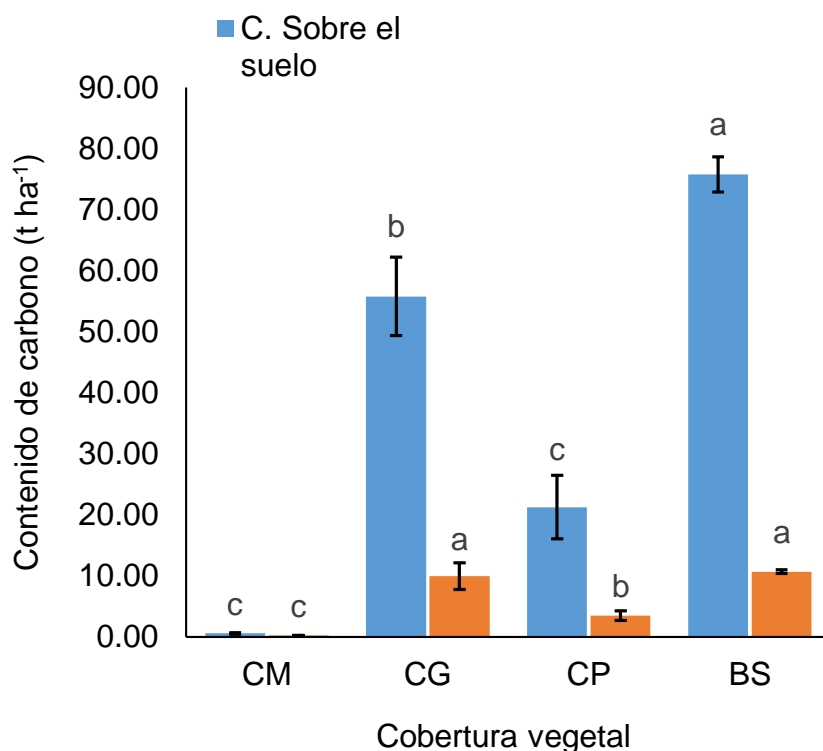


Figura 16

Prueba de Tukey para el contenido de carbono sobre el suelo y debajo del suelo

Las proporciones de carbono almacenadas en el estrato y en todo el sistema agroforestal cafetalero fueron afectados por el efecto de interacción de los diferentes tipos de sombra de café y componentes de carbono. En el estrato de café sombreado por Albizia había secuestrado el 56,3% del carbono en el AGC, el 30,5 % en el SOC, el 12,2 % en el BGC y el resto en la HC y la LC. De manera similar, el estrato de café sombreado por especies de árboles mixtos había secuestrado 50,5; 36,2; 11,1; 1,4 y 0,8 % en AGC (carbono aéreo), SOC, BGC (carbono subterráneo), HB y LB, respectivamente. Los resultados indican que la mayor proporción de carbono se almacenó en el grupo AGC seguido del grupo SOC (Niguse et al., 2022, p.5).

El almacenamiento de carbono de los diferentes sistemas agroforestales de café estudiados, varió con el tipo de árbol de sombra; el secuestro de carbono fue más alto en el café sombreado con Albizia seguido del estrato mixto de café sombreado por árboles y de los sistemas agroforestales de café bajo sombra de Syzygium. Los árboles de Albizia tienen un dosel grande que puede dar sombra a muchas plantas de café. Esto demuestra

que *A. gummifera* era un árbol de sombra adecuado para plantas de café. Por otro lado, la diversidad de especies de árboles en el estrato de árboles mixtos también podría haber creado suelos adecuados y ambientes para el crecimiento de las plantas de café, las especies de árboles, la riqueza influyó en el secuestro de carbono tanto en la superficie y depósitos de carbono subterráneos. Como resultado, la reserva de carbono de plantas de café cultivadas bajo varios árboles se utilizó para juzgar y clasificar la idoneidad de los árboles nativos para la sombra del café.

El COS medio de los sistemas agroforestales de café en el presente estudio ($91,5 \text{ t ha}^{-1}$) fue inferior a la reserva media de COS de $123,5 \text{ t ha}^{-1}$ a 60 cm de profundidad reportada por Solís et al. (2020), para café con sombra en la amazonia peruana. Las altas existencias de SOC en los sistemas sombreados se deben al alto aporte de materia orgánica de los árboles, al contenido adecuado de hojarasca en la superficie del suelo (Bruun et al., 2009; Hairiah et al., 2020). Ha sido ampliamente reconocido que las prácticas que mejoran las reservas de COS son importantes para garantizar la sostenibilidad de las funciones del suelo (Powlson et al., 2011, p.81).

La mayor estacionalidad de las precipitaciones a mayor altitud en Perú permite períodos más secos durante los cuales aumentan las tasas de mineralización. Este último puede dar como resultado 1) una menor acumulación de materia orgánica en el suelo, como lo indica la disminución de los valores de SOC, lo que permite una reserva más rica de nutrientes disponibles para las plantas y, por lo tanto, 2) favorece un aumento en el crecimiento de las plantas, como se muestra por mayores valores de AGC y BGC; Sin embargo, reconocemos que nuestras conclusiones deben tomarse con cautela, ya que los impulsores bióticos (p. ej., la red trófica del suelo, la competencia de las plantas sobre el suelo, etc.) y las variables que influyen en la dinámica del suelo (p. ej., el tipo de suelo, calidad y cantidad de residuos vegetales, así como calidad y cantidad de materia orgánica del suelo (De la Cruz-Amo et al., 2020, p.3).

CONCLUSIONES

1. Los árboles de sombra en los sistemas cafetaleros y la conservación de los bosques secundarios contribuyen al almacenamiento de carbono aéreo y, subterráneo en la provincia de Lamas.
2. La riqueza de especies arbóreas tuvo un impacto positivo sobre las existencias de carbono; al mismo tiempo que la mayor reserva de C de todos los sistemas de café investigados se encontró en el suelo. Por consiguiente, los sistemas agroforestales desempeñan un rol muy importante en la generación de carbono; y reducir la presión humana en terrenos boscosos.
3. Los árboles de sombra en fincas de café están influenciados por la compatibilidad de los árboles utilizados por los productores de fincas en el distrito de Tabalosos; por lo tanto, las plantas de café pueden ser consideradas importantes para la sostenibilidad de bosques.
4. La mayor presencia del contenido de glomalina contribuye al secuestro de carbono orgánico del suelo; inclusive en las capas profundas del suelo debido a la mayor estabilidad de la proteína observada en el estudio.
5. El aumento del contenido de limo y pH tendería a aumentar relativamente las existencias de carbono orgánico del suelo. Además, la textura del suelo tiene una clara influencia en la acumulación del carbono orgánico debido a la protección física de la MOS inducida por la agregación de partículas finas de limo.

RECOMENDACIONES

1. Realizar mayores estudios y expansión de la agricultura forestal del cultivo de café en San Martín.
2. Realizar estudios de almacenamiento de carbono en fincas de café orgánico y convencional en la amazonía peruana; conservar los árboles de sombra de tal manera que contribuyan a la mitigación del cambio climático.
3. Realizar estudios de carbono orgánico, carbono inorgánico y determinación de carbono crítico en suelos con diferentes coberturas vegetales.
4. Determinar contenidos de glomalina a lo largo de gradientes verticales de suelos de tal manera se encuentre un equilibrio entre la proteína del suelo y COS.
5. Evaluar la diversidad e índice de Shannon de los diferentes sistemas de café, de tal manera se pueda clasificar las especies que mejor se asocian a las variedades y producción del café en la región San Martín.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, L.K.; Robson, A.D. (1999). Factors influencing the occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 1991, 35, 121–150. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(91\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90048-3)
- Adame, M.F., Wright, S.F., Grinham, A., Lobb, K., Reymond, C.E., Lovelock, C.E., (2012). Terrestrialemarine connectivity: patterns of terrestrial soil carbon deposition in coastal sediments determined by analysis of glomalin related soil protein. *Limnol. Oceanogr.* 57. <https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.5.1492>
- Aduagna, A., Abegaz, A., Cerdà, A. (2015). Soil erosion assessment and control in Northeast Wollega, Ethiopia. *Solid Earth Discuss.* 7, 3511–3540. <https://doi.org/10.5194/sed-7-3511-2015>
- Akiyama, K.; Matsuzaki K.; Hayashi, H. (2005). Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature* 435: 824-827. <https://doi.org/10.1038/nature03608>
- Al-Areqi, A. H., M. Chliyeh., A. Ouazzani, R. Benkirane y A. Douira, (2014). *Effect of a composite endomycorrhizal inoculum on the growth of Coffea arabica seedlings*. International journal of plant, animal and environmental sciences, 4(1), 185-194.
- An, G.-H.; Miyakawa, S.; Kawaharu, A.; Osaki, M.; Ezawa, T. (2008). Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi associated with pioneer grass species *Miscanthus sinensis* in acid sulfate soils: Habitat segregation along pH gradients. *Soil Sci. Plant. Nutr.* 2008, 4, 517–528. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2008.00267.x>
- Andrade, H.; Brook, R.; Ibrahim, M. (2008). Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant Soil* 308 (1-2): 11-22.

- Andrade, H., Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* 10 (39-40):109-116.
- Arévalo, L.; Alegre J.; Palm, CH. (2003). Manual de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú. Ministerio de Agricultura. Pucallpa. Perú. 24 p.
- Aynekulu, E.; Denich, M.; Tsegaye, D.; Aerts, R.; Neuwirth, B.; Boehmer, H.J. (2011). Dieback affects forest structure in a dry Afromontane forest in northern Ethiopia. *J. Arid Environ.* 2011, 75, 499–503. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.12.013>
- Balesdent, J., Besnard, E., Arrouays, D., and Chenu, C. (1998). The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. *Plant Soil* 201 (1), 49–57. doi:10.1023/A:1004337314970
- Berta, G.; Trota, A.; Fusconi, A.; Hooker, J; Munro, M.; Atkinson, D.; Giovannetti, M.; Morini, S.; Fortuna, P.; Tisserant, B.; Gianinazzi-Pearson, V.; Gianinazzi, S. (1995). Cambios inducidos por micorrizas arbusculares en el crecimiento de las plantas y la morfología del sistema radicular en *Prunus cerasifera* *Tree Physiology*, v. 10, p. 15, núm. 5, pág. 281–293,
- Birhane, E.; Kuyper, T.W.; Sterck, F.J.; Bongers, F. (2010). Arbuscular mycorrhizal associations in *Boswellia papyrifera* (frankincense-tree) dominated dry deciduous woodlands of northern Ethiopia. *For. Ecol. Manag.* 2010, 260, 2160–2169. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.010>
- Birhane, E., Gebretsadik, K. F., Taye, G., Aynekulu, E., Rannestad, M. M., & Norgrove, L. (2020). Effects of Forest Composition and Disturbance on Arbuscular Mycorrhizae Spore Density, Arbuscular Mycorrhizae Root Colonization and Soil Carbon Stocks in a Dry Afromontane Forest in Northern Ethiopia. *Diversity*, 12(4), 133. <https://doi.org/10.3390/d12040133>
- Boddington, C., Dodd, J. (2000). The effect of agricultural practices on the development of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi. II. Studies in

experimental microcosms. *Plant and Soil*. 218, 145–157.
<https://doi.org/10.1023/A:1014911318284>

Borie F, Rubio R, Morales A (2008) Hongos micorrízicos arbusculares y agregación del suelo. *J Sci Sci Plant Nutr* 8: 9–18.

Brady, N.C. and Weil, R.R. (1996). *The Nature and Properties of Soils*; Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 1996.
https://testbank4textbook.com/pdf_samples/Solutions Manual for Nature and Properties of Soils 14th Edition by Brady sample chapter.pdf

Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., Malajczuck, N. (1996). Working whit mycorrhizas in forestry and agriculture. Camberra, Australia: ACIAR. 374 p.

Bruun TB, De Neergaard A, Lawrence D and Ziegler AD (2009) Environmental consequences of the demise in swidden agriculture in Southeast Asia: soil nutrients and carbon stocks. *Human Ecology* 37, 375–388.

Burrows, R.L.; Pflieger FL. (2002). Arbuscular mycorrhizal fungi respond to increasing plant diversity. *Canadian Journal of Botany* 80:120-130.
<http://www.mendeley.com/research/arbuscular-mycorrhizal-fungi-respondincreasing-plant-diversity-2/>

Caballero, L. (2021). Perfil de mercado de café. Ministerio de Relaciones exteriores, Lima, Perú. <https://www.cien.adexperu.org.pe/wp-content/uploads/2021/06/Perfil-del-Mercado-de-Caf%C3%A9-en-Grano-verde-a-Suiza.pdf>

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F. (2005). Tree lometry and improved estimation of carbón stocks and balance in tropical forests. *Oecología* 145 (1): 87-99.

Chen, S.; Wang, J.; Waigl, MG; Gao, Y. (2018). La proteína del suelo relacionada con la glomalina influye en la acumulación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por las raíces de las plantas. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 64(10), 465-473.

- Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. (1999). Disponible en <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Cuenca, G.; Lovera, M. (2010). Seasonal variation and distribution at different soil depths of arbuscular mycorrhizal fungi spores in a tropical sclerophyllous shrubland. *Botany*, 88, 54–64. <https://doi.org/10.1139/B09-100>
- Dai, J., Hu, J., Zhu, A., Bai, J., Wang, J., Lin, X. (2015). No tillage enhances arbuscular mycorrhizal fungal population, glomalin-related soil protein content, and organic carbon accumulation in soil macroaggregates. *J. Soils Sediments* 15, 1055–1062.
- Dawid y Piotr. (2022). Effect of pH on the sorption of dissolved organic carbon derived from six tree species in forest soils, *Ecological Indicators*, Volume 140, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108975>.
- Del Águila K.M., G. Vallejos-Torres y otros dos autores. (2018). Inoculación de consorcios micorrízicos arbusculares en *Coffea arabica*, variedad Caturra en la región San Martín, doi: 10.4067/S0718-07642018000100137, *Información Tecnológica*, 29(1), 137-146.
- De la Cruz-Amo, Ledia., Bañare de Dios, Guillermo., Cala Victoria., Granzow-de la Cerda, Iñigo., Espinoza, Carlos I., Ledo, Alicia., Salinas, Norma., Marcia, Manuel J., Cayuela, Luis. (2020). Compensaciones entre las existencias de carbono orgánico sobre el suelo, bajo el suelo y a lo largo de gradientes altitudinales en los bosques montanos tropicales de los Andes. *Ecología Vegetal Funcional*. Volumen 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00106>
- De Sousa, K., van Zonneveld, M., Holmgren, M., Kindt, R. y Ordoñez, J. (2021). El futuro de la agrosilvicultura de café y cacao en una Mesoamérica más cálida. *Informe científico* 9, 8828. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45491-7>
- Diagné, N.; Ndour, M.; Djighaly, P.; Ongm, D.; Ong, MCN; Ndong, G.; Svistoonoff, S.; Cherif-Silini, H. (2020). Efecto de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y hongos micorrízicos arbusculares (AMF)

sobre la tolerancia al estrés salino de *Casuarina obesa* (Miq.). *Fronteras en los sistemas alimentarios sostenibles*, v. 4, e601004.

- Durán P, Viscardi S, Acuña JJ, Cornejo P, Azcón R, de la Luz Mora M. (2018). Endophytic selenobacteria and arbuscular mycorrhizal fungus for selenium biofortification and *Gaeumannomyces graminis* biocontrol. *J Soil Sci Plant Nutr* 18:1021-1035. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005002902>
- Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kučera, Ludivino, Ch. y Habrová, H. (2016). Stock de carbono en cafetales agroforestales con diferentes árboles de sombra en Villa Rica, Perú. *Sistema Agroforestal* 90, 433–445. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9865-z>
- Gao, W, Wang, P, Wu, Q. (2019). Funciones y aplicación de proteínas del suelo relacionadas con glomalina: una revisión. *Sains Malaysiana* 48 (1): 111-119. <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4801-13>
- Gerdemann, J.W. y T.H. Nicolson. (1963). Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 46: 235-244.
- Gianfreda, L. y Bollag, J. M. (1996). Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. En: *Soil Biochemistry*, vol. 9 (Eds. Stolzky, G. y Bollag, J. M.) Marcel Dekker, Inc., New York; p. 123-193. [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjct55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=172172](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjct55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=172172)
- Girmay, G., Singh, B.R., Mitiku, H., Borresen, T., Lal, R. (2008). Carbon stocks in Ethiopian soils in relation to land use and soil management. *Land. Degrad. Dev.* 2008, 19, 351–367. <https://doi.org/10.1002/ldr.844>
- Gispert, M., Emran, M., Pardini, G., Doni, S., Ceccanti, B. (2013). The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content and aggregate stability. *Geoderma* 202, 51–61.
- Goncalves, N., Andrade, D., Batista, A., Cullen, L., Souza, A., Gomes, H. y Uezu, A. (2021). Impacto económico potencial del secuestro de carbono en los

sistemas agroforestales de café. *Sistema Agroforestal* 95, 419–430. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00569-4>

Gruba y Socha. (2019). Exploring the effects of dominant forest tree species, soil texture, altitude, and pH_{H2O} on soil carbon stocks using generalized additive models, *Forest Ecology and Management*, Volume 447, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.061>.

Hairiah, K., van, Noordwijk, M., Sari, R.R., Saputra, D.D., Widiyanto, Suprayogo, D, Kurniawan, S., Prayogo, C. and Gusli, S. (2020). Soil carbon stocks in Indonesian (agro) forest transitions: compaction conceals lower carbon concentrations in standard accounting. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 294, 106879

Hager, A. (2012) The effects of management and plant diversity on carbon storage in coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agroforest Syst.* 86:159–174
Doi 10.1007/s10457-012-9545-1

Harrison, R.B., Footen, P.W., Strahm, B.D. (2011). Horizontes profundos del suelo: contribución e importancia para las reservas de carbono del suelo y para evaluar la respuesta de todo el ecosistema a la gestión y al cambio global. *Para Sci* 57:67–76

He, X., Chen, C. He, B. (2011). Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin of *Hippophae rhamnoides* L. in farming-pastoral zone from the two northern provinces of China. *Acta Ecol Sin* 31, 1653–1661.

Hergoulach, K., Blancart, E., Skiba, U., Henault, C. y Harmand, J. M. (2012) Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture Ecosystems Environment*, 148:102–110. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.018>

Hillebrand, H. (2004). On the generality of the latitudinal diversity gradient. *Am. Nat.* 163, 192–211

- Huamán-Carrión, Mary L., Espinoza-Montes, Francisco, Barrial-Lujan, Abel I., & Ponce-Atencio, Yalmar. (2021). Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 83-90. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.010>
- Ibijbijen, J., Urquiaga, S., Ismaili, M., Alves, B.J.R., Boddey, R.M. (1996). Efecto de hongos micorrízicos arbusculares sobre el crecimiento, la nutrición mineral y la fijación de nitrógeno de tres variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris*). *New Phytologist*, v. 134, n. 2, pág. 353-360
- International Coffee Organization –ICO-. (2016). Exportable production by all exporting countries. London: ICO. Retrieved from http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics
- Irving, T., Alptekin, B., Kleven, B., Ané, J.M. (2021). Una revisión crítica de 25 años de investigación en glomalina: se requiere una mejor comprensión mecánica y técnicas robustas de cuantificación. *New Phytologist*, v. 232, n. 4, pág. 1572-1581.
- Janzen, H.H. (2004). Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective. *Agriculture Ecosystems y Environment* 104, 399–417
- Jansa, J., Bukovská, P., Gryndler, M. (2013). Mycorrhizal hyphae as ecological niche for highly specialized hypersymbionts - or just soil free-riders? *Frontiers Plant Sci* 4:134 <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00134>
- Jenkins, W. (1964). A rapid centrifugal flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Disease repórter*, 48, 692.
- Jobbágy, E.G., Jackson, R.B. (2000). La distribución vertical del carbono orgánico del suelo y su relación con el clima y la vegetación. *Aplicación ecológica* 10: 423–436
- Jobbágy, E. G., and Jackson, R. B. (2001). The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry* 53 (1), 51–77. doi:10.1023/A:1010760720215

- Jose, S. y Bardhan, S. (2012). Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: an overview. *Agroforestry Systems* 86:(2). 105-111. Doi: 10.1007/s10457-012-9573-x
- Kernaghan, G. (2005). Mycorrhizal diversity: Cause and effect? *Pedobiologia* 49: 511-520.
http://faculty.msvu.ca/fungal_ecology/Publi_Pdf/Mycorrhizal%20diversity-%20Cause%20and%20effect.pdf.
- Kivlin, S. N., Emery, S. M. & Rudgers, J. A. (2013). Fungal symbionts alter plant responses to global change. *Am. J. Bot.* 100, 1445–1457.
- Kreft, H. & Jetz, W. (2007). Global patterns and determinants of vascular plant diversity. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 104, 5925–5930.
- Kumar, S., Singh, A.K., Ghosh, P. (2018). Distribución del carbono orgánico del suelo y la proteína del suelo relacionada con la glomalina en una cronosecuencia de tierras de minas de carbón recuperadas en condiciones tropicales. *Sci Total Environ* 625: 1341-1350.
- Lenoir, I., Fontaine, J., Sahraoui, A.L.H. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: a review. *Phytochemistry* 123: 4–15
- León, V. D. (2006) Evaluación y caracterización de micorrizas arbusculares asociadas a yuca (*Manihot esculenta* sp) en dos regiones de la Amazonía colombiana. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10554/8323>
- Marro, N., Lax, P., Cabello, M., Doucet, Y.O., Becerra, A.G. (2014). Uso del hongo micorrízico arbuscular *Glomus intraradices* como agente de control biológico del nematodo *Nacobbus aberrans* que parasita el tomate. *Archivos Brasileños de Biología y Tecnología*, v. 57, n. 5, pág. 668-674.
- Martí-Roura, M., Hagedorn, F., Rovira, P., and Romanyà, J. (2019). Effect of land use and carbonates on organic matter stabilization and microbial

communities in Mediterranean soils. *Geoderma* 351, 103–115.
doi:10.1016/j.geoderma.2019.05.021

Merabtene, M.D., Faraoun, F., Mlih, R., Djellouli, R., Latreche, A. and Bol, R. (2021). Forest Soil Organic Carbon Stocks of Tessala Mount in North-West Algeria-Preliminary Estimates. *Front. Environ. Sci.* 8:520284. doi: 10.3389/fenvs.2020.520284

Ministerio de Agricultura y Riego. (2014). Plan Nacional de Renovación de Cafetales. Dirección General de Competitividad Agraria. Lima, Perú. 24p

Ministerio del Ambiente [MINAM] (2014). Guía para el muestreo de suelos. Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wpcontent/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOSfinal.pdf>

Mohammad, M.J.; Hamadt, S.R.; Malkawit, H.I. (2003). Population of arbuscular mycorrhizal fungi in semi-arid environment of Jordan as influenced by biotic and abiotic factors. *J. Arid Environ.* 2003, 53, 409–417. <https://doi.org/10.1006/jare.2002.1046>

Niguse G, Iticha B, Kebede G, Chimdi A (2022). Contribution of coffee plants to carbon sequestration in agroforestry systems of Southwestern Ethiopia. *The Journal of Agricultural Science* 1–8. <https://doi.org/10.1017/S0021859622000624>

Noda, Y. (2009). Las Micorrizas: Una alternativa de fertilización ecológica en los pastos. *Pastos y Forrajes*, 32(2), disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942009000200001&lng=es&tlng=es.

Oehl, F.; Sieverding, E.; Ineichen, K.; Ris, E.A.; Boller, T.; Wiemken, A. (2005). Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively managed agroecosystems. *New Phytol.* 2005, 165, 273–283. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01235.x>

- Pan, Y., Birdsey, RA, Fang, J., Houghton, RA, Kauppi, P., Kurz, WA, et al. (2011). Un sumidero de carbono grande y persistente en los bosques del mundo. *Ciencia* 333, 988–993. doi: 10.1126/ciencia.1201609
- Phillips, O., Brienen, R., y Rainfor. (2017). Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. *Carbon Balance Mnage*.
- Phillips, J. M. y D. S. Hayman. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection, *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Powlson, .DS., Gregory, P.J., Whalley, W.R., Quinton, J.N., Hopkins, D.W. (2011). Whitmore AP, Hirsch PR and Goulding KWT (2011a) Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.025>
- Ramírez-Builes, VH., Küsters, J., Souza, TR de; Simmes, C. (2020). Nutrición de calcio en el café y su influencia en el crecimiento, la tolerancia al estrés, la absorción de cationes y la productividad. *Fronteras en Agronomía* , v. 2, e590892.
- Rillig, M. C., P. W. Ramsey, S. Morris y E. A. Paul. (2003). Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. *Plant Soil* 253: 293-299.
- Robiglio, V., Baca, M., Donovan, J., Bunn, C., Reyes, M., Gonzáles, D., Sánchez, C. (2017). *Impacto del cambio climático sobre la cadena de valor del café en el Perú* Lima: ICRAF.
- Sagar, R., Singh, A., Singh, J.S. (2008). Differential effect of woody plant canopies on species composition and diversity of ground vegetation: A case study. *Trop. Ecol.* 2008, 49, 189–197. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=83de47f16e2dcdef923a6638cf34dd4c0efedde9>

- Sarkar, U., Choudhary, B.K., Sharma, B.K. (2014). Vascular arbuscular mycorrhizal (VAM) spore diversity and density across the soil of degraded forest and rubber plantation in Tripura, India. *Am. Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 14, 1080–1088. DOI: 10.5829/idosi.aej.2014.14.10.12432
- Schulten, H. R., Leinweber, P., and Sorge, C. (1993). Composition of organic matter in particle-size fractions of an agricultural soil. *J. Soil Sci.* 44 (4), 677–691. doi:10.1111/j.1365-2389.1993.tb02332.x
- Seguel, A., Rubio, S., Carrillo, R., Espinosa, A.; Borie, F. (2008). Niveles de glomalina y su relación con características químicas y biológicas del suelo (Andisol) en un relicto de bosque nativo del sur de Chile. *Bosque*, v. 28, n. 1, p. 11-22.
- Shukla, A., Vyas, D., Jha, A. (2013). Soil depth: An overriding factor for distribution of arbuscular mycorrhizal fungi. *J. Soil Sci. Plant. Nutr.* 2013, 13, 23–33. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000003>
- Simard, S., Durall, D. (2004). Mycorrhizal networks: a review of their extent, function and importance. *Can J Bot.* 82:1140-65.
- Singh, A. K., Rai, A., Pandey, V. & Singh, N. (2017). Contribution of glomalina to dissolve organic carbon under different land uses and seasonality in dry tropics. *Journal of Environmental Management* 192, 142–149 (2017).
- Singh, G., Bhattacharyya, R., Das, T.K., Sharma, A.R., Ghosh, A., Das, S., Jha, P., (2018). Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalina and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. *Soil Tillage Res.* 184, 291–300.
- Sivakumar, N. (2013). Effect of edaphic factors and seasonal variation on spore density and root colonization of arbuscular mycorrhizal fungi in sugarcane fields. *Ann Microbiol* 63, 151–160. <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0455-2>

- Smith, S.E.; Read, D.J. *Mycorrhizal Symbiosis*, 3rd ed.; Academic Press Ltd.: Cambridge, UK, (2008).
https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=qLciOJaG0C4C&oi=fnd&pg=PP1&ots=zryYgXTApJ&sig=Ta23N9IQrnFwofex76nrjhMXvDY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Solis R, Vallejos-Torres G., Arévalo L., Marín-Díaz J., Ñique-Alvarez M., Engedal T. and Bruun T. (2020) Carbon stocks and the use of shade trees in different coffee growing systems in the Peruvian Amazon. *The Journal of Agricultural Science* 158, 450–460.
- Souza, B. A., Rosa, J. C., Siqueira-Gay, J., & Sánchez, L. E. (2021). Mitigating impacts on ecosystem services requires more than biodiversity offsets. *Land Use Policy*, 105, 105393.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105393>
- Tang, H., Liu, L., Wang, L. & Ba, C. (2009). Effect of land use type on profile distribution of glomalin. *Zhongguo Shengtai Nongye Xuebao/Chinese Journal of Eco-Agriculture* 17, 1137–1142 (2009).
- Tedersoo, L. et al. (2014). Global diversity and geography of soil fungi. *Science* 346, 1256688.
- Torres N, Antolín MC, Goicoechea N. (2018). Arbuscular mycorrhizal symbiosis as a promising resource for improving berry quality in grapevines under changing environments. *Frontiers in Plant Science* 9: 987.
- Vallejos-Torres, Geomar, Arévalo, Luis, Iliquin, Ingrid, y Solis, Reynaldo. (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://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600073>
- Vallejos-Torres, G.; Espinoza, E.; Marín-Díaz, J.; Solís, R.; Arévalo, L. (2021). El papel de los hongos micorrízicos arbusculares contra las infecciones por nematodos agalladores en plantas de café. *Revista de Ciencias del Suelo y Nutrición Vegetal*, vol. 21, núm. 1, pág. 364–373,

- Větrovský, T., Kohout, P., Kopecký, M. Machac, A., Man, M., Bahnmann, B., Brabcová, V., Choi, J., Meszárošová, L., Human, Z., Lepinay, C., Lladó, S., López-Mondéjar, R. y Baidrian, P. (2019). A meta-analysis of global fungal distribution reveals climate-driven patterns. *Nature Communications* 10, 5142. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13164-8>
- Verma, N.; Tarafadar, J.C.; Shrivastava, K.K. (2010). Periodic changes in *Prosopis cineraria* associated AM population at different soil depth and its relationship with organic carbon and soil moisture. *Afr. J. Microbiol.* 2010, 4, 115–121. <https://academicjournals.org/journal/AJMR/article-full-text-pdf/4C50A9B11533.pdf>
- Villoslada, J.E. (2017). “Evaluación del potencial ecosistémico de un bosque secundario y su influencia en la captura de carbono, en el sector Puerto Motilones, Distrito de Moyobamba-2015” (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de San Martín, Perú. <https://tesis.unsm.edu.pe/handle/11458/2625>
- Wang, W., Zhong, Z., Wang, Q. *et al.* (2017). Glomalin contributed more to carbon, nutrients in deeper soils, and differently associated with climates and soil properties in vertical profiles. *Sci Rep* 7, 13003 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12731-7>
- Wang, Q., Wang, W., Zhong, Z. *et al.* (2020). Variation in glomalin in soil profiles and its association with climatic conditions, shelterbelt characteristics, and soil properties in poplar shelterbelts of Northeast China. *J. For. Res.* 31, 279–290 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00909-w>
- Weller, K. (2002). Glomalin: hiding place for a third the world's stored soil carbon. *Agric. Res. Magazine* 50: 4- 7.
- Wipf, D., Krajinski, F., Tuinen, DV, Recorbet, G. y Courty, P. (2019). Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal Networks. *New Phytologist* 223: 1127–1142 doi: 10.1111/nph.15775.

- Wright, S.F., and A. Upadhyaya. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci.* 161:575–586.
- Yan, G., Wang, Q., Han, S., Guo, Z., Yu, J., Wang, W., Fan, C., Cao, W., Wang, L., Xing, Y. y Zhang, Z. (2022). Beneficial effects of warming on temperate tree carbon storage depend on precipitation and mycorrhizal types, *Science of The Total Environment*, 819. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153086>.
- Yang Y, Luo W, Xu J, Guan P, Chang L, Wu X and Wu D (2022) Fallow Land Enhances Carbon Sequestration in Glomalin and Soil Aggregates Through Regulating Diversity and Network Complexity of Arbuscular Mycorrhizal. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.930622>
- Yohannes, Y.; Webb, P. (1999). Classification and regression trees, CART. A user manual for identifying indicators of vulnerability to famine and chronic food insecurity. In *Microcomputers in Policy Research No. 3*; International Food Policy Research Institute: Washington, DC, USA, 1999. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=7iuq4ikyNdoC&oi=fnd&pg=PR5&ots=ML9eiw0pjS&sig=YqNPm2n937F0dlwbDHqNEuyBI4g&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Zaro, G. C., Caramori, P. H., Yada, G. M., Sanquetta, C., Filho, A. A., Nunes, A., Prete, C. y Voroney, P. (2020). Secuestro de carbono en un sistema agroforestal de café con árboles de caucho en comparación con café a cielo abierto en el sur de Brasil. *Sistema Agroforestal* 94, 799–809 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z>
- Zhang, J., Li, J., Ma, L., Zhanfeng, X. et al. (2022). Accumulation of glomalin-related soil protein benefits soil carbon sequestration: Tropical coastal forest restoration experiences. <https://doi.org/10.1002/ldr.4192>
- Zhao, Z.; Xia, Y.; Qin, X.; Li, X.; Cheng, L.; Sha, T.; Wang, G. (2001). Arbuscular mycorrhizal status of plants and the spore density of arbuscular mycorrhizal fungi in the tropical rain forest of Xishuangbanna, southwest

China. *Mycorrhiza* 2001, 11, 159–162.
<https://doi.org/10.1007/s005720100117>

Zhao, C.C., Fu, S.L., Mathew, R.P., Lawrence, K.S., Feng, Y.C., (2015). Soil microbial community structure and activity in a 100-year-old fertilization and crop rotation experiment. *J. Plant Ecol.* 8, 623–632.

Zhou, X., Wang, J., Jiang, Y., Leng, G., Vasilyeva, G. K., Waigi, M. G., & Gao, Y. (2022). Characterization of Different Molecular Size Fractions of Glomalin-Related Soil Protein From Forest Soil and Their Interaction With Phenanthrene. *Frontiers in microbiology*, 12, 822831. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.822831>

Zhang, J., Tang X.L., He X.H., Liu, J.X. (2015). Respuestas de proteínas del suelo relacionadas con la glomalina a la adición elevada de CO₂ y nitrógeno en un bosque subtropical: posibles consecuencias para la acumulación de carbono en el suelo. *Bioquímica del suelo Bioquímica* 83:142–149

ANEXOS

Tabla 9

Datos promedios de textura y micorrización

Tipos de cobertura	Prof.	N° Planta	pH	Limo (%)	Colonización (%)	Conteo de esporas de HMA	Glomalina (mg/g)
Café+Monocultivo	0-15	1	5,31	23,28	45,7	145	24,36
		2	5,53	17,28	46,7	112	12,57
		3	5,42	20,28	39,8	125	18,47
Café+Monocultivo	15-30	1	5,33	20,28	38,7	102	11,46
		2	5,44	17,28	38,8	107	8,88
		3	5,385	18,78	39	104	10,17
Café+Guaba	0-15	1	5,74	20,28	35,00	119	13,96
		2	5,69	26,28	42,70	110	13,19
		3	5,715	23,28	40,30	134	13,58
Café+Guaba	15-30	1	5,54	20,28	26,9	101	7,52
		2	5,63	26,28	35	97	8,50
		3	5,585	23,28	31,9	103	8,01
Café+Policultivo	0-15	1	7,39	20,28	25,8	99	8,81
		2	6,11	17,28	32	89	16,72
		3	6,75	18,78	32,7	104	12,77
Café+Policultivo	15-30	1	7,57	17,28	23,7	59	6,82
		2	5,4	23,28	22	67	1,39
		3	6,485	20,28	25,8	59	4,10
Bosque secundario	0-15	1	6,58	14,28	26,30	170	6,22
		2	6,11	17,28	28,70	163,00	7,91
		3	6,345	15,78	33,00	162,00	7,07
Bosque secundario	15-30	1	6,28	8,28	21,5	122	4,28
		2	5,5	14,28	24	111	6,18
		3	5,89	11,28	19,6	109	5,23

Tabla 10

Datos promedios de contenido de carbono en diferente cobertura vegetal

Tipos de cobertura	Prof.	N° Planta	COS (t ha⁻¹)	C. sobre el suelo (t ha⁻¹)	C. subterráneo (t ha⁻¹)
Café+Monocultivo	0-15	1	23,87	0,51	0,18
		2	40,24	0,78	0,27
		3	19,95	0,45	0,17
Café+Guaba	0-15	1	59,65	51,5	9,45
		2	46,98	40,92	7,51
		3	30,38	74,85	12,82
Café+Policultivo	0-15	1	77,43	13,91	2,35
		2	57,17	24,65	3,91
		3	45,46	25,18	4,19
Bosque secundario	0-15	1	45,12	74,84	10,56
		2	30,48	79,65	11,09
		3	31,80	72,77	10,36

Rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín

por Wilder Macedo Cordova

Fecha de entrega: 26-oct-2023 12:04p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2208109129

Nombre del archivo: de_Carbono_en_suelos_de_ecosistemas_con_cafe_en_San_Martin.docx (8.52M)

Total de palabras: 15736

Total de caracteres: 87201

Rol de la glomalina en el almacenamiento de carbono en suelos de ecosistemas con café en San Martín

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet	5%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
3	repositorio.ucss.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Nacional Agraria de la Selva Trabajo del estudiante	1%
5	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	tesis.unsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
8	www.unas.edu.pe Fuente de Internet	1%