

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**RECUPERACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO EN UNA PASTURA
DEGRADADA MEDIANTE SISTEMAS AGROFORESTALES EN
YURIMAGUAS**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERA AGRÓNOMA

MARÍA FERNANDA MOYA AMBROSIO

LIMA - PERÚ

2020

La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**RECUPERACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO EN UNA PASTURA
DEGRADADA MEDIANTE SISTEMAS AGROFORESTALES EN
YURIMAGUAS**

MARÍA FERNANDA MOYA AMBROSIO

Tesis para optar el Título de:

INGENIERA AGRÓNOMA

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

.....
Dr. Alberto Marcial Julca Otiniano
PRESIDENTE

.....
Dr. Julio César Alegre Orihuela
ASESOR

.....
Ing. Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez
MIEMBRO

.....
Dr. Constantino Sabino Calderón Mendoza
MIEMBRO

.....
Dr. Sady Javier García Bendezú
CO-ASESOR

LIMA – PERÚ

2020

Dedicatoria

A mi familia, por su amor, paciencia e
incondicional apoyo.

Gracias por estar conmigo siempre.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, el Dr. Julio Alegre Orihuela por su dirección, sus enseñanzas y paciencia; por confiar en mí para la realización de esta investigación y mi participación en otras.

A mi Co asesor, el Dr. Sady García Bendezú, por su paciencia y orientación. Por su disposición a aclarar mis dudas.

A Carlos Mestanza, por su apoyo incondicional en el análisis estadístico y en la redacción de esta investigación. Gracias por estar conmigo siempre.

A mis amigas; María Claudia Cruz y Grecia Malaver, por su arduo apoyo en la etapa de campo y en laboratorio, gracias por compartir su amistad conmigo.

Al personal de trabajo del laboratorio de microbiología de Suelos, por su apoyo y paciencia en la fase de análisis microbiológico de mis muestras.

A los señores William, Wagne y Santos, por la ayuda brindada durante la etapa de campo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. SUELOS TROPICALES DEL PERÚ	3
2.1.1. La amazonia	3
2.1.2. Los suelos tropicales	3
2.2. FACTORES DE DEGRADACIÓN	4
2.2.1. La deforestación	4
2.2.2. El sobrepastoreo	4
2.3. CALIDAD DEL SUELO	5
2.4. INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO	7
2.5. AGROFORESTERÍA	7
2.5.1. Sistemas agroforestales (SAFs).....	8
2.6. ÍNDICE DE CALIDAD	8
2.6.1. Selección del conjunto mínimo de datos (CMD).....	8
2.6.2. Estandarización de indicadores	9
2.6.3. Ponderación de indicadores.....	9
2.6.4. Índice de calidad del suelo ponderado (ICSw).....	9
III. MATERIALES Y METODOS	10
3.1. LUGAR DE ESTUDIO	10
3.2. FASE DE CAMPO	10
3.2.1. Tratamientos.....	11
3.2.2. Equipos y materiales.....	13
3.2.3. Codificación y colección de muestras	14
3.3. VARIABLES.....	14
3.4. FASE DE LABORATORIO	15
3.4.1. Tinción y cuantificación de la colonización de hongos micorrizíco arbuscular (HMA)	15
3.4.2. Aislamiento y cuantificación de esporas de HMA.....	16
3.4.3. Diluciones seriadas	17
3.4.4. Respiración y biomasa microbiana.....	18

3.5.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	18
3.6.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO.....	19
3.7.	PROCESAMIENTO DE LA DATA	20
3.7.1.	Índice de calidad del suelo (ICS)	20
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	22
4.1.	ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL SUELO.....	22
4.2.	CALIDAD DEL SUELO	24
4.2.1.	Selección del conjunto mínimo de datos	24
4.2.2.	Ponderación de los indicadores de la calidad del suelo.....	25
4.2.3.	Índice de calidad del suelo ponderado (ICS _w).....	26
4.3.	COMPARACIÓN DE MEDIAS DE LAS VARIABLES BIOLÓGICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS.....	30
4.3.1.	Colonización y esporas de HMA	30
4.3.2.	Población microbiana	32
4.3.3.	Respiración y biomasa microbiana.....	35
4.3.4.	Humedad gravimétrica (H _d) y Densidad aparente (D _a).....	37
4.3.5.	Materia orgánica (MO) y Fósforo (P).....	38
V.	CONCLUSIONES.....	41
VI.	RECOMENDACIONES	42
VII.	BIBLIOGRAFIA.....	43
VIII.	ANEXOS.....	48

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Variables seleccionadas	14
Tabla 2. Medios nutritivos para el crecimiento de la población microbiana (Bacterias, Hongos y Actinomicetos).	18
Tabla 3. Distribución de grados de libertad por fuente de variación.....	19
Tabla 4. Análisis de Componentes Principales y Ponderación específica para cada CP.....	25
Tabla 5. Ponderaciones finales para cada variable (Pv).....	25
Tabla 6. Efecto de los tratamientos sobre el indicador de calidad del suelo ponderado (ICS w)	28
Tabla 7. Efecto de los sistemas agroforestales y la pastura sobre el porcentaje de Colonización y número de esporas de HMA	31
Tabla 8. Efecto de los tratamientos sobre la población microbiana	34
Tabla 9. Efecto de los tratamientos sobre la respiración y biomasa microbiana.....	35
Tabla 10. Efecto de los tratamientos sobre la humedad gravimétrica y la densidad aparente.....	37
Tabla 11. Efecto de los tratamientos sobre la materia orgánica y el fosforo del suelo...	39

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa de la localización del lugar de estudio.....	10
Figura 2. Distribución de tratamientos replicados en las parcelas de los agricultores Roberto, Washington y Clais.....	11
Figura 3. Distribución de especies en el SAF A.....	12
Figura 4. Distribución de especies en el SAF B.....	12
Figura 5. Distribución de especies en el SAF C.....	13
Figura 6. Tipo de Suelo en Yurimaguas.....	23
Figura 7. Mapa de clasificación de uso de tierras para Yurimaguas.....	23
Figura 8. Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre las variables biológicas, físicas y químicas.....	24
Figura 9. Biplot de las contribuciones al componente principal 1 y 2.....	26
Figura 10. Índice de Calidad del suelo en la ubicación de copa.....	29
Figura 11. Índice de Calidad del suelo en la ubicación de camino.....	29
Figura 12. Efecto de los tratamientos sobre la colonización de raíces.....	31
Figura 13. Efecto de los tratamientos sobre el número de esporas en el suelo.....	32
Figura 14. Efecto de los tratamientos sobre la población de Bacterias en el suelo.....	33
Figura 15. Efecto de los tratamientos sobre la población de hongos en el suelo.....	33
Figura 16. Efecto de los tratamientos sobre las actinobacterias en el suelo.....	33
Figura 17. Efecto de los tratamientos sobre la respiración en el suelo.....	36
Figura 18. Efecto de los tratamientos sobre la biomasa microbiana en el suelo.....	36
Figura 19. Efecto de los tratamientos sobre la humedad gravimétrica del suelo.....	38
Figura 20. Efecto de los tratamientos sobre la densidad aparente del suelo.....	38
Figura 21. Efecto de los tratamientos sobre la Materia orgánica en el suelo.....	39
Figura 22. Efecto de los tratamientos sobre el fosforo disponible en el suelo.....	40

ANEXOS

Pág.

Anexo 1. Análisis de caracterización de los suelos de los sistemas agroforestales y la pastura	48
Anexo 2. Contribuciones de cada variable para los cinco componentes principales evaluados	49
Anexo 3. Ponderaciones específicas y ponderación final para cada variable	49
Anexo 4. Estadísticos del análisis de comparación de medias Tukey de los Índices de Calidad del Suelo (ICS _w).....	50
Anexo 5. ANOVA de los Índices de Calidad del Suelo ponderado	51
Anexo 6. ANOVA de la Colonización de HMA	52
Anexo 7. ANOVA del Numero de esporas de HMA	52
Anexo 8. ANOVA de la población de bacterias.....	52
Anexo 9. ANOVA de la población de Hongos	53
Anexo 10. ANOVA de la población de actinobacterias	53
Anexo 11. ANOVA de la respiración microbiana.....	53
Anexo 12. ANOVA de la biomasa microbiana	54
Anexo 13. ANOVA de la humedad gravimétrica.....	54
Anexo 14. ANOVA de la densidad aparente	54
Anexo 15. ANOVA de la Materia orgánica	55
Anexo 16. ANOVA del fósforo.....	55
Anexo 17. Fotos.....	56

RESUMEN

Los sistemas agroforestales (SAF) mantienen niveles intermedios de biodiversidad entre bosques naturales y sistemas agrícolas. Mediante el uso de índices de calidad del suelo se ha demostrado que los SAF pueden reducir la degradación del suelo en un largo periodo de tiempo. Esta investigación se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de cuatro SAF sobre la calidad de un suelo degradado por sobrepastoreo. Los SAF A, B y C tenían tres años de edad y presentaban cobertura de centrocema (*Centrosema macrocarpum*), el SAF D tenía cuatro años de edad y no presentaba cobertura, y el testigo fue una pastura degradada. El muestreo se realizó en época seca. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones, dos lugares de muestreo y dos profundidades. Los indicadores de calidad del suelo evaluados fueron: la población de hongos, bacterias y actinobacterias, el porcentaje de infección micorrízica, el recuento de esporas de micorrizas, la tasa de respiración basal, el carbono de la biomasa microbiana, la densidad aparente, el contenido de humedad gravimétrica y los contenidos de materia orgánica oxidable y de fósforo extractable (Olsen). El Índice de Calidad del Suelo ponderado (ICS_w) fue mayor para los Sofás que, para la pastura degradada, demostrándose así que los SAF favorecieron la recuperación de la calidad del suelo. Los indicadores más influenciados por los Sofás fueron los microbiológicos: las esporas de HMA, la infección micorrízica, la población de bacterias, actinobacterias y hongos, y la biomasa microbiana.

Palabras clave: calidad del suelo, recuperación del suelo, sistemas agroforestales, micorrizas.

ABSTRACT

Agroforestry systems (SAF) maintain intermediate levels of biodiversity between natural forests and agricultural systems. Using soil quality indices, it has been shown that SAFs can reduce soil degradation over a long period of time. This research was conducted to evaluate the effect of four SAF on the quality of a soil degraded by overgrazing. SAFs A, B, and C were three years old and had centrocema cover (*Centrosema macrocarpum*), SAF D was four years old and had no cover, and the control was a degraded pasture. Sampling was done during the dry season. The experimental design used was complete randomized blocks with three repetitions, two sampling sites and two depths. Soil quality indicators evaluated were: fungi, bacteria and actinobacteria population, mycorrhizal infection percentage, mycorrhizal spore count, basal respiration rate, microbial biomass carbon, bulk density, gravimetric moisture content and oxidizable organic matter and extractable phosphorus (Olsen) contents. The Weighted Soil Quality Index (ICS_w) was higher for SAF than for degraded pasture, thus demonstrating that SAFs favored the recovery of soil quality. The indicators most influenced by the SAF were microbiological: HMA spores, mycorrhizal infection, population of bacteria, actinobacteria and fungi, and microbial biomass.

Key word: soil quality, soil recovery, agroforestry systems, mycorrhiza.

I. INTRODUCCIÓN

Estudios de degradación del suelo en la región amazónica de América Latina en los últimos 30 años (Montanarella et al., 2016), mencionan que el principal factor de agotamiento del suelo es la erosión. El Programa de la FAO Land Degradation Assessment in Drylands, concluyó que el país presenta el 54% de la superficie con degradación moderada, severa y muy severa, causada principalmente por la deforestación y el sobrepastoreo (Global Green Growth Institute, Deutsches Institut Für Entwicklungspolitik, y Servicio Nacional Forestal y de Fauna Salvaje, 2015). El cambio de uso de la tierra y su subsiguiente explotación, ocasiona la pérdida de la estructura del suelo y contribuye a su degradación (Sauer y Hernandez-Ramirez, 2011) Según la Plataforma de monitoreo de los cambios sobre la cobertura de los bosques GEOBOSQUES (2017), del 2000 al 2017, se han perdido 2,130,122 ha de bosques debido a actividades humanas como el uso inapropiado de tierras, la deforestación y la agricultura migratoria, entre otras. Como consecuencia, el suelo pierde su calidad y es impedido de funcionar bien, participar en el equilibrio y conservación de recursos como el agua, la flora y la fauna y producir suficientes alimentos (Estrada-Herrera et al., 2017).

Es necesario realizar estrategias específicas para reducir la degradación del suelo, mediante la aplicación de las buenas prácticas agronómicas y el desarrollo de metodologías de evaluación y monitoreo. Estas estrategias no pueden ser las mismas para cada región del país. En el caso de la selva, que es una de las regiones más vulnerables a la degradación de los suelos, se tienen como opciones los sistemas agroforestales o agrosilvopastoriles. Otros autores mencionan que el manejo de los sistemas agroforestales con los cultivos de cobertura, magnifica la protección, conservación o recuperación del suelo. (Alegre, Lao, Silva, y Schrevens, 2017).

Para saber qué tan bien funciona un suelo específico dentro de un ecosistema definido, el concepto de calidad del suelo puede usarse como un puente entre los intereses y preocupaciones de nuestra clientela rural, urbana y suburbana (Karlen et al., 1997). En ese sentido, la calidad del suelo es definida en términos de sus atributos o indicadores, entre los cuales se puede contar a las propiedades físicas, químicas y biológicas, y a los procesos (Karlen et al., 1997; Lutters y Salazar, 1999).

Esta investigación propone que los Sistemas agroforestales mejorarán los indicadores de calidad del suelo resultando en un incremento del Índice de Calidad del Suelo, comparándolos con una pastura degradada; para ello, los objetivos planteados son los siguientes:

Objetivo general

- Evaluar el efecto de cuatro sistemas agroforestales sobre la calidad de un suelo degradado por sobrepastoreo.

Objetivos específicos

- Determinar la influencia de los sistemas agroforestales sobre los indicadores de la calidad del suelo.
- Comparar la calidad de suelos de cuatro sistemas agroforestales con un suelo degradado por sobrepastoreo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. SUELOS TROPICALES DEL PERÚ

2.1.1. La amazonia

La Amazonía peruana es un territorio paradójico, pues es reflejo de una riqueza inigualable, que ocupa el cuarto lugar en la lista de los países con mayor superficie de bosques tropicales del mundo y es una de las pocas regiones en la que más del 50 % de la cobertura forestal sigue intacta; pero también está sometida a graves problemas como es la explotación forestal, en particular la explotación ilegal de la madera, el avance de la deforestación, entre otros. Debido a que es una de las regiones con mayor crecimiento demográfico por la constante migración interna, se registra como una de las regiones con elevados niveles de desnutrición (Mendoza Villarreal y Zavala Respaldiza, 2013). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2018), el censo del 2007, el 13.4 % de la población nacional estaría concentrada en la Amazonía, donde de este total, el 64 % son pobladores urbanos y el resto se ubica en la zona rural.

2.1.2. Los suelos tropicales

Desde un punto de vista agropecuario, existen dos zonas bien diferenciadas edáficamente: una de ellas con suelos moderadamente profundos, de textura moderadamente fina a fina, con drenaje natural bueno a moderado, fertilidad natural baja con niveles bajos de fósforo y potasio y reacción fuertemente ácida, lo que conlleva a la necesidad de aplicación de fertilizantes de reacción neutra o básica como nitrato de calcio, superfosfato triple, y aplicaciones de materiales encalantes como calizas o dolomitas; y la otra, presenta las mejores condiciones edáficas, con suelos profundos a moderadamente profundos (limitados por un nivel freático fluctuante), de textura media a moderadamente gruesa, de reacción moderadamente ácida a neutra, con deficiencia de nutrientes como el fósforo y potasio y expuesto a la inundabilidad por los ríos, especialmente el río Huallaga, Paranapura y Marañón (Gobierno Regional de Loreto, Municipalidad Provincial Alto Amazonas, y el Instituto de Investigaciones de la Amazonía, 2015).

2.2. FACTORES DE DEGRADACIÓN

2.2.1. La deforestación

El (Global Green Growth Institute et al., 2015), menciona que según la distribución geográfica en el territorio, en la última década el 70 % de la deforestación en términos absolutos ocurrió en: San Martín, Loreto, Ucayali y Huánuco y según el análisis por categoría territoriales, los mayores niveles de deforestación ocurren en bosques sin asignación de categoría legal o derecho otorgado (45 %), donde cualquier uso no autorizado es ilegal; en comunidades nativas tituladas (16 %) y en Bosques de Producción Permanente no concesionados (12 %), designados para uso futuro (títulos habilitantes), pero que aún no tienen derechos de uso otorgados, lo que hace ilegal cualquier tipo de aprovechamiento, donde en este último, se evidencia que la tierra que no está categorizada es mucho más propensa a la deforestación, así como aquellos bosques de producción permanente reservados para el aprovechamiento futuro.

2.2.2. El sobrepastoreo

En regiones tropicales la conversión extensiva de bosques a pasturas y la intensificación agrícola son típicamente identificadas como los conductores más importantes de cambio en el uso del suelo, con consecuente pérdida de su calidad y biodiversidad (Vallejo, 2013). La problemática de los pastos a nivel nacional, deriva principalmente de la baja productividad de este recurso, además, se han identificado como problemas principales la estacionalidad de la producción de pastos y la poca disponibilidad de biomasa y calidad nutritiva. Las causas principales son las inadecuadas prácticas de manejo de las pasturas, la alta carga animal por hectárea (sobrepastoreo), la escasez de agua durante la época seca, el efecto de fenómenos naturales (exceso de lluvias y heladas) en zonas alto andinas, la escasez de germoplasma con especies forrajeras de calidad, la erosión de los suelos y los procesos de deforestación, la insipiente organización de los productores, la ausencia de programas de mejoramiento de praderas nativas y el retraso tecnológico (Instituto Nacional de Innovación Agraria (INEI, 2009).

2.3. CALIDAD DEL SUELO

El concepto ha sido y es razón de mucha discusión por los científicos. El carácter subjetivo del término, unido a la dependencia de factores externos al mismo, tales como el uso funcional, interacciones con los ecosistemas, la incidencia de ciertas prioridades políticas y socioeconómicas, dificultan las posibilidades de alcanzar un consenso (Jiménez y González, 2006). Sin embargo, al centrarse en qué tan bien funciona un suelo específico dentro de un ecosistema definido, el concepto de calidad del suelo puede usarse como un puente entre los intereses y preocupaciones de nuestra clientela rural, urbana y suburbana (Karlen et al., 1997). Cabe resaltar que muchas de las definiciones a lo largo de la historia, usan los términos de salud y calidad del suelo como sinónimos, sin embargo, Doran y Zeiss (2000) mencionan que el término calidad del suelo generalmente se asocia con la capacidad del suelo para un uso específico y el término salud del suelo se usa en un sentido más amplio para indicar la capacidad del suelo para funcionar como un sistema vital para mantener la productividad biológica, promover la calidad ambiental, y mantenimiento de la sanidad vegetal y animal, es decir, la salud del suelo es sinónimo de sostenibilidad.

Bünemann et al. (2018) indica que la mención más antigua de la calidad del suelo es por Mausel en 1971, quien la define la calidad del suelo como la capacidad de los suelos para el rendimiento de maíz, soja y trigo en condiciones de gestión de alto nivel. Posteriormente en los años 90, surgieron muchos autores con conceptos similares: Larson y Pierce (1994): “Capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites de los ecosistemas e interaccionar positivamente con el medio ambiente externo a ese ecosistema”; Arshad y Coen (2013): “Capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, preservando un ambiente sano”; Doran y Parkin “Capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites de los ecosistemas para sostener la productividad biológica, mantener la calidad medioambiental, y promover la salud de animales y plantas” (Larson y Pierce, 1994); La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (1995) la define como la “Capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar, dentro de los límites de los ecosistemas naturales o manejados, para mantener la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y respaldar la vivienda y la salud humana” (Karlen, Andrews, y Doran, 2004); Doran con: “Capacidad de un suelo para funcionar, dentro de los límites del ecosistema y del uso de la tierra, para mantener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de

las plantas, los animales y la salud humana” (Bünemann et al., 2018); y Carter con: “Utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo”; “Aptitud de un tipo específico de suelo para funcionar con su entorno, respaldar la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire y respaldar la salud y la vivienda humanas” (Carter et al., 1995)

Doran y Parkin mencionan que hay un rasgo común a todas las definiciones realizadas, la calidad del suelo debe tener en cuenta tres aspectos fundamentales: productividad, calidad ambiental y salud (Karlen et al., 2004). Por otro lado, para Carter et al. (1995) y Doran y Zeiss (2000), la calidad del suelo tiene dos partes: una parte intrínseca que cubre la capacidad inherente de un suelo para el crecimiento de los cultivos determinado por las propiedades físicas y químicas dentro de las restricciones establecidas por el clima y el ecosistema; y una parte dinámica influenciada por el usuario o administrador mediante las decisiones de manejo y uso del suelo.

Importancia biológica del suelo

En la actualidad las propiedades biológicas se han convertido en criterios importantes para valorar el manejo o uso de los suelos, de tal forma que se crea la necesidad de orientar la producción agropecuaria hacia nuevas tecnologías fundamentadas en la recuperación de los suelos degradados a través de un manejo agroecológico sostenido que favorezca la biodiversidad (Vallejo, 2013). En algunos casos, cambios en la actividad de las poblaciones microbianas pueden preceder a cambios detectables en la física del suelo y las propiedades químicas, proporcionando así una señal temprana de mejoramiento del suelo o una advertencia temprana de degradación del suelo (Nielsen y Winding, 2002).

Existe una creciente evidencia de que los procesos microbiológicos pueden responder a las perturbaciones durante escalas de tiempo más cortas que otras propiedades del suelo (De la Paz, De la Horra, Pruzzo, y Palma, 2002). Entre los parámetros microbianos utilizados vale la pena mencionar las actividades enzimáticas; la biomasa microbiana total; la respiración microbiana; el recuento de hongos totales; la densidad de grupos funcionales de bacterias como las nitrificantes, desnitrificantes y fijadoras de N; así como estudios a nivel de la estructura y composición de las comunidades llevados a cabo a través de metodologías independientes de cultivo como los perfiles de ácidos grasos de fosfolípidos (PLFA, por sus

siglas en inglés) y la electroforesis en gel en gradiente denaturante (DGGE, por sus siglas en inglés) (Vallejo, 2013).

.

2.4. INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO

La calidad del suelo no se puede medir directamente, pero se debe inferir a partir de los cambios en los atributos del ecosistema, que se conocen como indicadores (Jiménez y González, 2006). Los indicadores de la calidad de suelo se conciben como una herramienta de medición que debe ofrecer información sobre las propiedades, los procesos y las características, para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un periodo dado (García y Ramírez, 2012).

La identificación de atributos o indicadores clave del suelo que son sensibles a las funciones del suelo permite el establecimiento de conjunto mínimo de datos (Larson y Pierce, 1994). Tales conjuntos de datos se componen de un número mínimo de propiedades del suelo que proporcionarán una evaluación práctica de uno o varios procesos de importancia para que un suelo específico funcione (Carter et al., 1995). Idealmente, la propiedad debe medirse fácilmente, y las mediciones son reproducibles y están sujetas a cierto grado de estandarización.

2.5. AGROFORESTERÍA

Farrell y Altieri (2009) mencionan que la agroforestería es el nombre genérico utilizado para describir un sistema de uso de la tierra antiguo y ampliamente practicado, en el que los árboles se combinan espacial y/o temporalmente con animales y/o cultivos agrícolas. Para Gold y Garrett (2009) la esencia de la agroforestería se describe en cuatro palabras clave: intencional, ya que implica que los sistemas se diseñan y administran intencionalmente como una unidad completa; intensiva, porque los sistemas se administran intensamente para obtener beneficios productivos y protectores, por lo cual se ha argumentado que la intensificación agroforestal implica la inclusión de árboles genéticamente superior, es decir domesticados (Leakey, 2012); interactiva, entre los componentes del sistema árbol, cultivo y animal; e integrador, pues se refiere a las combinaciones estructurales y funcionales de los componentes como una unidad de gestión integrada. Según el ICRAF, la agroforestería es un sistema dinámico y ecológicamente sólido de gestión de recursos naturales. Al integrar

árboles en granjas y en el paisaje agrícola, ayuda a diversificar y mantener la producción para mejorar los beneficios económicos, ambientales y sociales” (World Agroforestry Centre, 2008). Aunque los enfoques agroforestales tienen un mayor potencial para lograrlos en muchos entornos ecológicos y socioeconómicos que la mayoría de los otros enfoques del uso de la tierra, si se realiza la elección equivocada de combinaciones de especies, prácticas de manejo y falta de motivación y comprensión de la gente, la agroforestería puede fallar al igual que cualquier otra forma de uso de la tierra, y seguirá siendo agroforestal en el sentido objetivo de la palabra (Nair, 2014).

2.5.1. Sistemas agroforestales (SAFs)

Los sistemas agroforestales mantienen niveles intermedios de biodiversidad entre bosques naturales y usos puramente agrícolas de la tierra y, por lo tanto, pueden aumentar la conectividad o mantener la biodiversidad en paisajes forestales fragmentados (Haggar, Pons, Saenz, y Vides, 2019). Básicamente, involucra la mezcla deliberada de árboles y arbustos, colectivamente llamados plantas perennes leñosas o árboles, en la misma unidad de tierra que los cultivos agrícolas o animales, ya sea en alguna forma de disposición espacial o secuencia temporal (Nair, 2014).

2.6. ÍNDICE DE CALIDAD

Los índices presentan una cantidad muy heterogénea de indicadores, desde el índice sintético altamente informativo de la calidad del suelo, hasta el índice aditivo ponderado (ICS_w) con 67 (Sarmiento, Fandiño, y Gómez, 2018).

2.6.1. Selección del conjunto mínimo de datos (CMD)

Los indicadores son seleccionados de un conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y forman el “conjunto mínimo de datos” (CMD) (Doran y Zeiss, 2000; Karlen et al., 2004; Larson y Pierce, 1994). Según Andrews et al. (2002), el CMD para evaluar la calidad del suelo puede ser seleccionado utilizando la opinión de los expertos, las funciones de pedotransferencia o con procedimientos estadísticos multivariados. Para reducir el número de indicadores para el cálculo del ICS, una herramienta muy usada es la matriz de correlación, la cual permite eliminar indicadores redundantes dentro del CMD.

2.6.2. Estandarización de indicadores

Luego de la selección del CMD, los indicadores son transformados, con funciones lineales o no lineales, a un sistema adimensional para ser incluidos en el índice de la calidad del suelo (ICS) (Anaya y Jaramillo, 2017). En este caso, la estandarización se refiere a la transformación de los indicadores a valores en una escala 0-1 (por métodos lineales), teniendo en cuenta el comportamiento de cada uno de ellos en el suelo.

2.6.3. Ponderación de indicadores

La ponderación se realiza utilizando los resultados del ACP. Los valores propios o autovalores representan la variación de los sistemas, por lo tanto, si son altos la representación es más significativa. Los componentes principales (CP) explican una cierta cantidad (%) de la variación en el conjunto total de datos, este porcentaje estandarizado a la unidad proporciona el peso para los indicadores (S.S. Andrews, Karlen, y Mitchell, 2002).

2.6.4. Índice de calidad del suelo ponderado (ICS_w)

El índice de calidad de suelo aditivo ponderado (ICS_w) se ha utilizado para integrar indicadores adimensionales en los índices de calidad del suelo (Nabiollahi, Taghizadehmehrjardi, y Eskandari, 2017).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. LUGAR DE ESTUDIO

El estudio se realizó en el centro poblado Santo Tomás, ubicado en el distrito de Yurimaguas, provincia de Alto Amazonas, departamento de Loreto. La latitud y longitud corresponden a 5°45' LS y 76°05' LO respectivamente y la altitud es de 182 msnm.

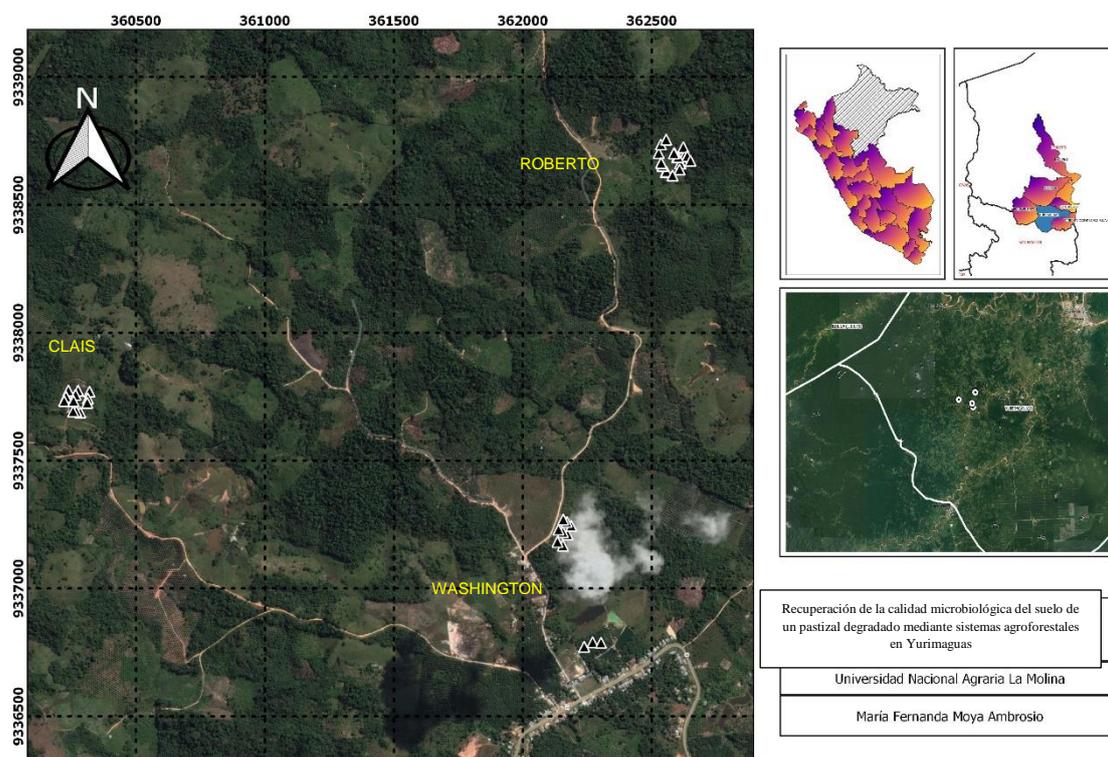


Figura 1. Mapa de la localización del lugar de estudio

3.2. FASE DE CAMPO

Se realizó en cinco parcelas correspondiente a cinco tratamientos replicados en las tierras de tres agricultores (Washington, Roberto y Clais) como se observa en la Figura 2. En tres de ellas estaban los SAF A, B y C, instalados y manejados por el Proyecto IUC-VLIR-UNALM,

otra tenía el SAF D, instalado por EL Proyecto Especial Datem del Marañon, Alto Amazonas, Loreto (PEDAMAL), y la última era una pastura degradada perteneciente al mismo agricultor (T).

Para la toma de muestras, se subdividió cada tratamiento (A, B, C, D y T) en tres áreas, y en cada una de ellas se consideró dos lugares de muestreo: altura de copa (c) y camino (ca), y dos profundidades: superior (0-5 cm) e inferior (5-15 cm), con tres repeticiones. La toma de muestras se realizó en época seca (agosto del 2018).



Figura 2. Distribución de tratamientos replicados en las parcelas de los agricultores Roberto, Washington y Clais.

3.2.1. Tratamientos

Cuatro tratamientos son prototipos de Sistemas Agroforestales (SAF) implementados sobre una pastura degradada, y uno es una pastura (fragmento del área original antes de la instalación de los SAF).

Los SAF A, B y C tenían tres años de edad y presentaron cobertura *Centrosema macrocarpum* (*Centrosema*). el SAF A tenía especies agroforestales maderables de rápido crecimiento, bolaina (*Guazuma crinita*) y marupa (*Simarouba amara*), y lento crecimiento, capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y caoba (*Swietenia macrophylla*); el SAF B tenía especies maderables de rápido crecimiento, *Guazuma crinita* (bolaina), y de lento crecimiento, *Cedrelinga catenaeformis* (tornillo), y frutales, *Bactris gasipaes* (pijuayo), *Inga edulis* (guaba); y el SAF C tenía especies maderables de rápido y lento crecimiento para sistemas silvopastoriles, *Guazuma crinita* (bolaina), *Simarouba amara* (marupa) y *Calycophyllum spruceanum* (capirona); el SAF D instalado por el Proyecto Especial Datem del Marañon, Alto Amazonas, Loreto (PEDAMAL), con casi 4 años de edad, tenía diferentes

especies forestales: marupa, bolaina, capirona y tornillo, no presentaba cobertura, y fue manejado solo por el agricultor; y el tratamiento control fue una pastura de *Brachiaria brizantha* de 10 años de edad, la cual es considerada la edad cero.

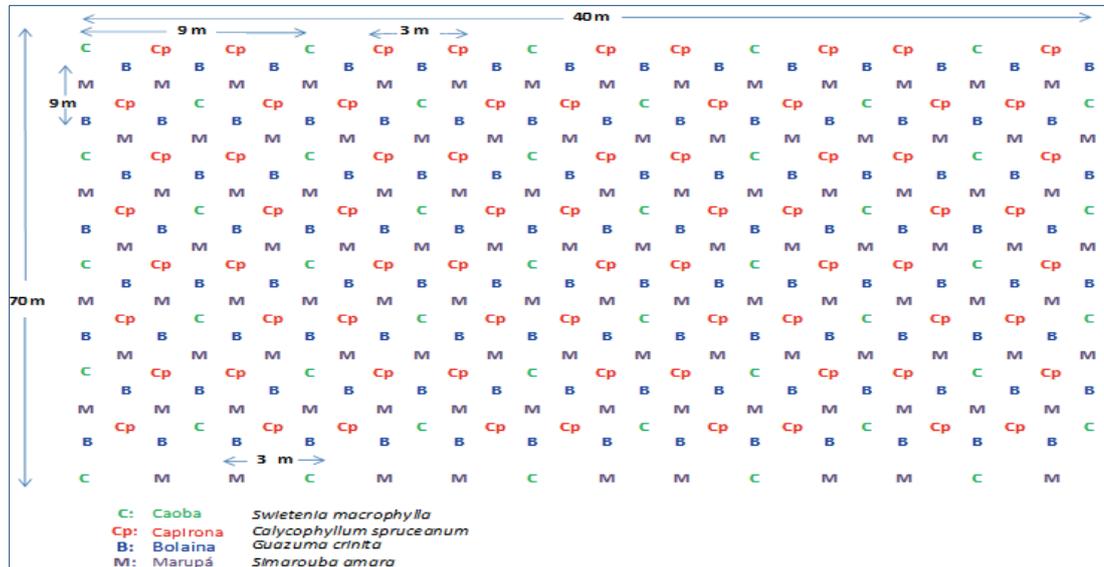


Figura 3. Distribución de especies en el SAF A

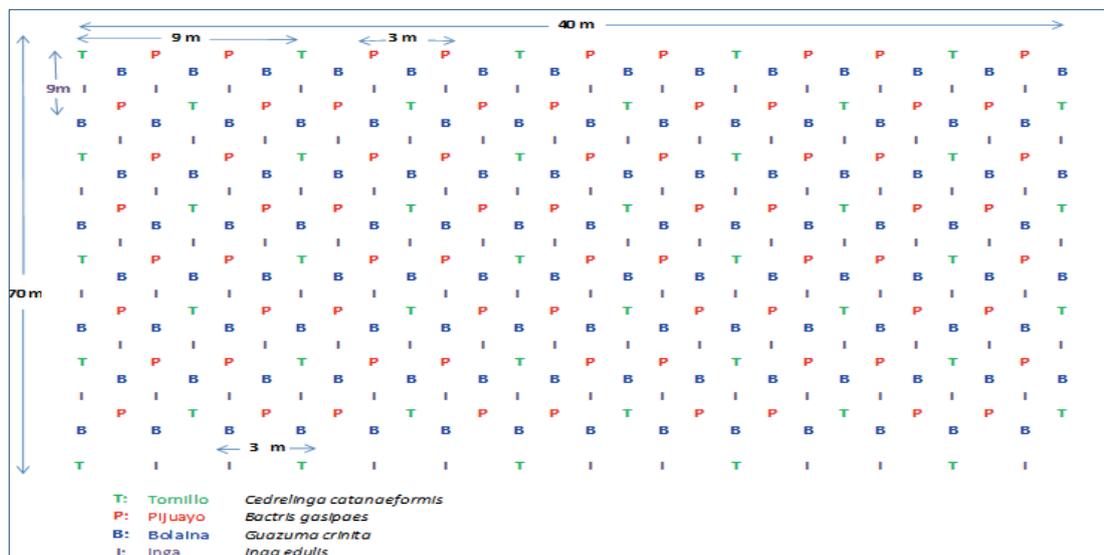


Figura 4. Distribución de especies en el SAF B

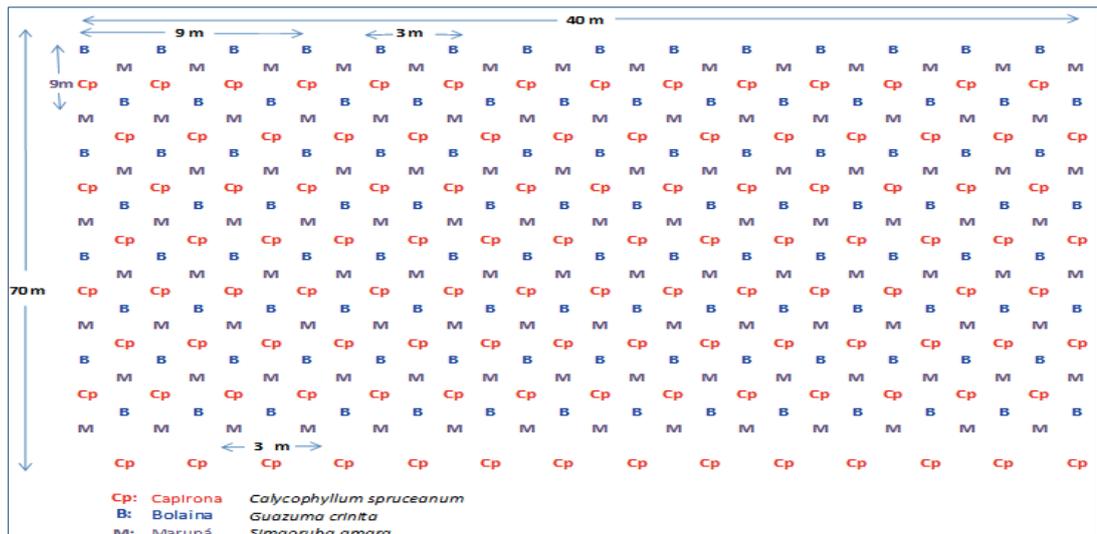


Figura 5. Distribución de especies en el SAF C

3.2.2. Equipos y materiales

Los equipos de campo a usarse son:

- Palitas jardineras
- Palanas, machetes
- Cilindro muestreador con manubrio
- Comba de jebe
- Cuchillo
- Tijera
- Franela
- Penetrómetro de bolsillo.

Los materiales son:

- Etiquetas
- Bolsas de papel y de polietileno
- Lápiz
- Cinta de embalaje
- Costales
- Marcadores
- Bolsas de gelpack
- Cajas aislantes y cinta film.

3.2.3. Codificación y colección de muestras

La toma de muestras se realizó en época seca en el mes de junio. Se realizó una calicata de 20x20x15 cm y se limpió la superficie, en uno de los lados se limitó las profundidades de 0-5 y de 5-15 cm y se tomó una muestra de 300 g de suelo aproximadamente junto con las raíces y hojarasca, se colocó en una bolsa codificada y se almacenó en cajas aislantes con gel refrigerante para su envío vía terrestre hasta el laboratorio de microbiología de suelos de La Universidad Nacional Agraria La Molina para su posterior análisis.

La codificación de cada una de las 150 muestras colectadas fue la siguiente: bloque (agricultor), tratamiento (A, B, C, D y T), repetición (1,2,3), lugar de muestreo (copa, camino), y profundidad (0-5,5-15 cm); Por ejemplo: “RA1a (0-5)”.

3.3. VARIABLES

Las variables seleccionadas para ser indicadores de calidad fueron 11. Siete son microbiológicos, dos físicos y dos químicos, y son los siguientes:

Tabla 1. Variables físicas, químicas y biológicas.

Variable	Abreviación	Descripción
Población de hongos (UFC/g)	Hong	Dilución seriada y cultivo en placas
Población de bacterias (UFC/g)	Bac	Dilución seriada y cultivo en placas
Población de actinobacterias (UFC/g)	Act	Dilución seriada y cultivo en placas
Colonización micorrízica (%)	Col	Tinción y cuantificación de la colonización de HMA
Esporas de micorrizas (Esp/100 g)	Esp	Aislamiento y cuantificación de esporas de HMA
Respiración basal mg (CO ₂ /g/día)	R	Incubación
Biomasa microbiana (mg C/kg)	Bm	Fumigación con cloroformo e incubación
Densidad aparente (g/cm ³)	Da	Método del cilindro
Humedad gravimétrica (%)	Hd	Método gravimétrico
Materia orgánica (%)	MO	Método de Walkey y Black (Bazan 2006)
Fósforo extractable (mg/kg)	P	Método de Olsen modificado

3.4. FASE DE LABORATORIO

El análisis microbiológico se realizó en el Laboratorio de Microbiología de suelos de la Facultad de Agronomía de La Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.4.1. Tinción y cuantificación de la colonización de hongos micorrízico arbuscular (HMA)

El método está basado en las referencias de (Giovannetti y Mosse 1980) y (Vierheiling et al. 1998). Consiste en la decoloración con KOH de tejidos de la raíz y su posterior tinción con una solución de vinagre y tinta para visualizar colonización del hongo micorrízico arbuscular.

Los materiales y reactivos utilizados fueron:

- Pinzas y bisturíes
- Tubos de ensayo de 50ml
- Placas petri
- Estereoscopio
- Cuadrícula de papel 1cm²
- Agua desionizada
- Hidróxido de potasio (KOH) 10%
- Ácido clorhídrico (HCl) 1%
- Tinta azul 5% (Tinta azul en vinagre)
- Agua acidulada

Después de separar las raíces del suelo, se seleccionaron las raíces no leñosas entre finas y gruesas en un tubo Pyrex de 50 ml y se lavaron hasta liberar de partículas de suelo con agua corriente y se conservó en alcohol al 25 %. Se agregó una solución de KOH para eliminar la pigmentación y se sometió a una temperatura de 90 °C durante 40 minutos, luego se decantó la solución, se enjuagó las raíces con agua desionizada y se adicionó ácido clorhídrico por 5 minutos para retirar rastros del KOH. Se adicionó la tinta azul al 5 % y se sometió a una temperatura de 90 °C por 40 minutos, luego de obtener las raíces debidamente teñidas, se procedió a cortarlas en segmentos de casi 2 cm y se colocaron en placas manejando tres

repeticiones por muestra. Finalmente, para la visualización de segmentos de raíces se utilizó un estereoscopio y para identificar las intersecciones de raíces colonizadas, se colocó papel filtro cuadrulado (1 cm²) al exterior de la base de la placa.

Cálculo del porcentaje de colonización de HMA:

$$C = \left(\frac{Sc}{St} \right) \times 100$$

Donde:

Sc = Numero de segmentos colonizados intersectados

C% = Porcentaje de colonización

St = Numero de segmentos intersectados

3.4.2. Aislamiento y cuantificación de esporas de HMA

El método que se utilizará está basado en las referencias de Brundrett et al. (1994), y Gerderman y Nicholson (1963) con algunas modificaciones, su fundamento consiste en el uso de tamices de similar diámetro de las esporas de los HMA para separarlas de partículas gruesas y restos vegetales; y mediante una solución de sacarosa aislar las esporas de las otras partículas por su potencial osmótico.

Los materiales fueron los siguientes:

- Frascos de vidrio con tapa
- Baguetas y pinzas
- Tamices de 250 µm y de 53 µm
- Piseta
- Tubos de centrífuga
- Crisol
- Cuadrícula de papel filtro
- Embudo Büchner
- Placas
- Estereoscopio
- Kitasato

- Centrífuga
- Solución de sacarosa 50 %

Se pesó el equivalente a 10 g de suelo seco y se colocó en frascos de vidrio manejando tres repeticiones por muestra, se agregó agua a los frascos y se agitó aproximadamente 2 minutos hasta que se disgregaron las partículas de suelo. Se tamizó el sobrenadante a través de los tamices de 250 μm y 56 μm ., y se colectó el residuo que quedó retenido en el tamiz de 56 μm en los crisoles para ser trasvasado a los tubos de centrifuga de 50ml. Se procedió a centrifugar a 3000 rpm por 3 minutos; se eliminó el sobrenadante y se agregó la solución de sacarosa; y se volvió a centrifugar los tubos a 2000 rpm por 2 minutos usando el freno de mano al finalizar las revoluciones. Finalmente, se tamizó el sobrenadante de los tubos a través del tamiz de 53 μm , y se colectó el residuo en un crisol. Se vertió el contenido del crisol sobre la cuadrícula de papel filtro colocado sobre el embudo Buchner y se esperó a que filtre para ser colocado en una placa petri e iniciar el conteo de esporas con la ayuda de un estereoscopio.

3.4.3. Diluciones seriadas

La determinación de la población bacterias, hongos y actinobacterias se realizó mediante la técnica de dilución sucesiva en placas. Este método permite calcular la densidad microbiana en una cantidad de suelo conocida. Consiste en preparar una solución patrón de suelo, la cual se va diluyendo (todo en condiciones asépticas) en series decimales y se inocula en medio nutritivo para favorecer el crecimiento de microorganismos. Para la determinación de bacterias se puede utilizar medio Glucosa-Peptona-Agar, para actinobacterias medio almidón caseína y para hongos medio de Martin.

Tabla 2. Medios nutritivos para el crecimiento de la población microbiana (Bacterias, Hongos y Actinomicetos).

Componente	Composición (g/L)		
	Medio glucosa- peptona-agar	Medio de Martin	Medio caseína
Glucosa (g)	1	10 g	0 g
K ₂ HPO ₄	0.5 g	0 g	0.2 g
KH ₂ PO ₄	0 g	1 g	0 g
MgSO ₄ .7H ₂ O	0.2 g	0.5 g	0.2 g
Fe(SO ₄) ₃ .9H ₂ O	0.01 g	0 g	---
Peptona	5 g	5 g	---
Levadura	2.5 g	---	---
Caseína	---	---	3.7 g
Agar	15 g	20 g	15 g
Rosa bengala	---	0.03 g	---
Agua destilada	1000 ml	1000 ml	1000 ml
pH	7.0	5.6	7.0

3.4.4. Respiración y biomasa microbiana

El método que se utilizó está basado en la técnica de fumigación - extracción de Jenkinson y Powelson (1976) el cual consiste en el análisis del CO₂ liberado en muestras de suelo previamente fumigadas con cloroformo, defumigadas y posteriormente inoculadas con suelo fresco y comparadas a su vez con otras muestras de suelo sin fumigar.

Los materiales son los siguientes:

3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Corresponde un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con arreglo factorial de cinco tratamientos evaluados: Sistema agroforestales A, B, C, D, y una pastura, con tres bloques y tres repeticiones. El modelo aditivo lineal es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + t_i + \beta_j + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Resultados obtenidos en el k-ésima calicata del i-ésimo sistema en el j-ésimo bloque

μ = Efecto de la media general

t_i = Efecto del i-ésimo sistema

β_j = Efecto del j-ésimo bloque

ε_{ijk} = Efecto debido a la k-ésima calicata del i-ésimo sistema en el j-ésimo bloque (error experimental).

Tabla 3. Distribución de grados de libertad por fuente de variación.

Fuente de variación	Grados de libertad (G.L):	
Tratamientos (A)	A – 1	4
Bloque (B)	B – 1	2
Error experimental	(AxB)(R-1)	30
Total	(AxBxR) – 1	44

3.6. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos de la evaluación de variables en los diferentes tratamientos serán sometidos al análisis de variancia (ANOVA). Los promedios serán comparados mediante la prueba de comparación de medias HSD (diferencia honestamente significativa) de Tukey con un nivel de significación de 0.05. Para visualizar las relaciones entre variables y tratamientos, se realizarán matrices de correlación y un análisis de componentes. El análisis estadístico será realizado empleando el paquete *Agricolae* del ambiente para computación estadística R, versión 3.4.1 (R Core Team, 2017).

3.7. PROCESAMIENTO DE LA DATA

3.7.1. Índice de calidad del suelo (ICS)

Selección del conjunto mínimo de datos (CMD)

Se seleccionaron siete indicadores microbiológicos, dos físicos y dos químicos. Se realizó una matriz de correlación para descartar la redundancia de indicadores por alta correlación. Se realizó una matriz de correlación para reducir el número de indicadores. De ese modo, se obtuvo el CMD conformado por los indicadores no redundantes.

Estandarización de indicadores

Los indicadores fueron transformados por métodos lineales. A cada indicador se le asignó una calificación según los métodos “más es mejor” (ecuación 1), y “menos es mejor” (ecuación 2), utilizados por S.S. Andrews, Karlen, y Mitchell, (2002), como se indica:

$$Vn = \left(\frac{Im - Imin}{Imax - Imin} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Vn = 1 - \left(\frac{Im - Imin}{Imax - Imin} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

Vn = Valor normalizado

Im = medida del indicador

Imax = valor máximo

Imin = valor mínimo

De los indicadores biológicos, la colonización y el número de esporas de HMA fueron tomados según el método de la ecuación 2; y de los indicadores químicos, la materia orgánica fue considerada como la ecuación 1 debido a que, por tratarse de suelos tropicales, los valores no llegan a ser altos. Se trabajó con todas las variables sin descartar ninguna.

Ponderación de los indicadores de la calidad del suelo

Se realizó un ACP y se consideró los componentes que tenían autovalores >1 (S.S. Andrews et al., 2002) para calcular las ponderaciones específicas (Pe) para cada componente dividiendo el porcentaje de variancia entre el porcentaje de variancia acumulado hasta el último PC seleccionado, para finalmente calcular la ponderación de cada variable mediante la siguiente formula:

$$W = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Pe_i}{100}\right) \times \left(\frac{Ci}{100}\right)$$

Dónde:

W = Ponderación de la variable

Pe = Ponderación específica del PC

C = Contribución de la variable en el PC

n = número de PC seleccionados

Índice de calidad del suelo ponderado (ICS_w)

Transformados los indicadores y definidos los ponderadores respectivos para cada indicador, se calcularon los correspondientes ICS_w, con la siguiente ecuación (S.S. Andrews et al., 2002).

$$ICS_w = \sum_{i=1}^n w_{ix} Vn_i$$

Dónde:

ICS_w = Índice de calidad ponderado

W = Ponderación de la variable

Vn = Valor normalizado

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL SUELO

Según el análisis de caracterización de suelos, las parcelas implementadas con sistemas agroforestales (SAF) a los tres años de crecimiento y las pasturas (testigo) tienen suelos de texturas Franco, Franco arenoso y Franco arcilloso. Los suelos de las parcelas ubicadas en la propiedad de los agricultores Washignton y Roberto tenían extremada acidez en un rango de pH de 4.1 a 4.7, baja conductividad eléctrica, contenido regular de materia orgánica de 0.8 a 2.3 %, regular fósforo (hasta 5.9 ppm), hasta 1.7 meq/100g de calcio y saturación de bases entre 33 a 54%. Los suelos de las parcelas ubicadas en la propiedad del agricultor Clais, presentaron extremada acidez (pH promedio de 3.7), bajo contenido de calcio (menor a 0.8 meq/100g) y saturación de base de 15 a 25 %

Los suelos de las pasturas, evidenciaron suelos de baja fertilidad, extremada acidez (pH promedio de 3.5), regular contenido de materia orgánica de 1.2%, bajo contenido de fósforo entre 2.6 y 3ppm, bajo contenido de calcio (menor a 0.5 meq/100g) y alta saturación de aluminio entre 79 y 82 %; muy parecido a los suelos de las parcelas ubicadas en la propiedad del agricultor Clais.

Los suelos de Yurimaguas están referenciados en el Mapa Mundial de suelos como Dystric Cambisol, Eutric Fluvisols o Dystric Gleysols (Gardi et al., 2014) según el sistema de clasificación World Reference Base for Soil Resources (WRB) (Figura 2); otros estudios mencionan que se trata de Ultisols, Inceptisols, Alfisols o Entisols (Tyler, Buol, y Sanchez, 1987) y según el sistema de clasificación Soil Taxonomy, siendo Ultisol el más característico para el lugar de estudio según (Alegre et al., 2017).

La clasificación de tierras según su capacidad de uso mayor califica los suelos de la zona de estudio como tierras aptas para Producción Forestal, de calidad agrológica media, con limitaciones por suelos y riesgo de erosión (Gobierno Regional de Loreto et al., 2015); sin

embargo, estudios realizados por Alegre y Cassel (1996) en el trópico húmedo de la amazonia peruana, reportaron que los suelos de Yurimaguas presentan degradación de los suelos, la cual es intensificada por la agricultura migratoria y el sobrepastoreo, como se observó en el sistema de la pastura de esta investigación. Cabe resaltar que existen opciones de recuperación con coberturas y establecimiento de especies forestales con diferentes arreglos agroforestales (Alegre et al., 2017).

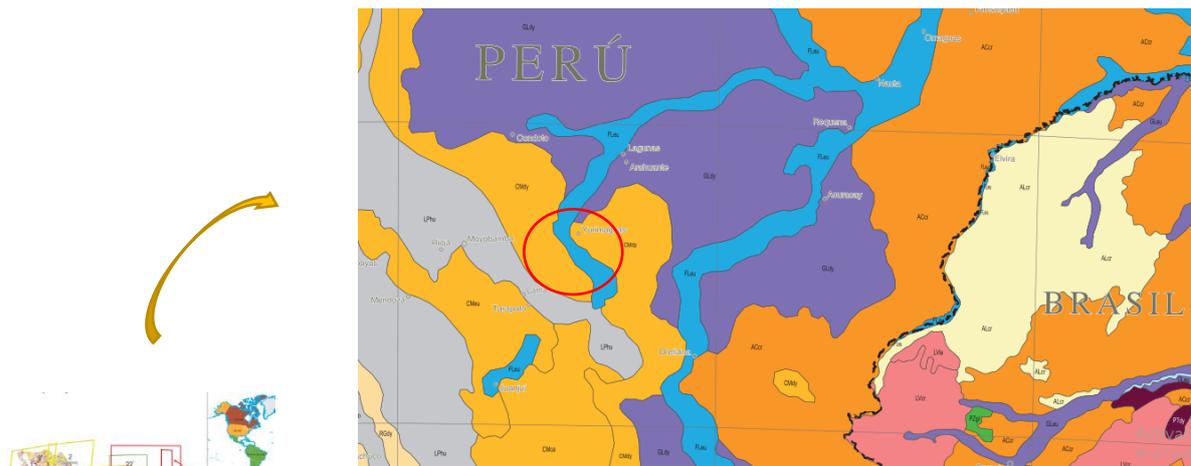


Figura 6. Tipo de Suelo en Yurimaguas

Fuente: Atlas mundial del suelo

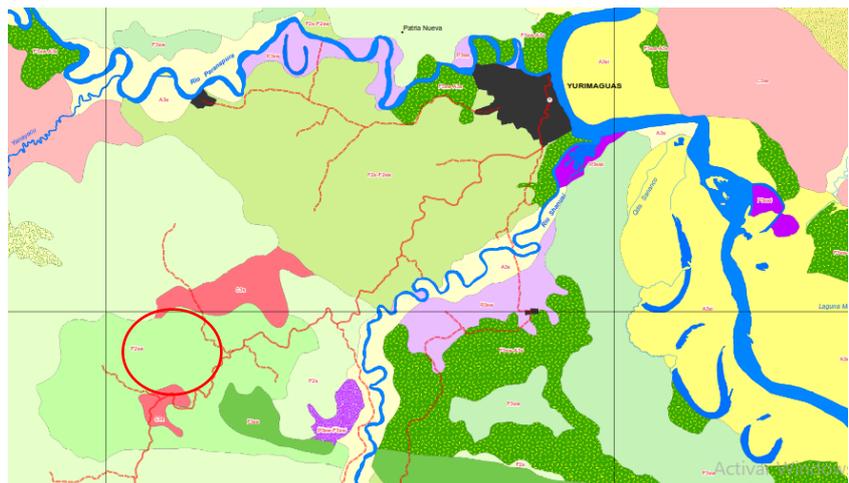


Figura 7. Mapa de clasificación de uso de tierras para Yurimaguas

Fuente: ZEE Alto Amazonas

4.2. CALIDAD DEL SUELO

4.2.1. Selección del conjunto mínimo de datos

En la figura 8, se presenta el análisis de asociación de todas las variables estudiadas. Se determinó que casi todas tienen correlación lineal con un coeficiente de Pearson mayor o igual a 0.4, excepto la respiración. La redundancia por alta correlación entre variables no fue excluyente, es decir, se consideró a todas las variables en el CMD para el cálculo del índice de calidad del suelo.

El análisis de correlación mostró que no hubo una notable correlación positiva ni negativa entre las bacterias, los hongos y la humedad del suelo, como si obtuvieron Wang, Yu, Zhou, y Fu (2016).

La abundancia de HMA no se correlacionó significativamente con la mayoría de las variables evaluadas, como si obtuvo Liu et al. (2017). Los HMA y las actinobacterias no estuvieron asociadas al P, como si encontró Buyer et al. (2017).

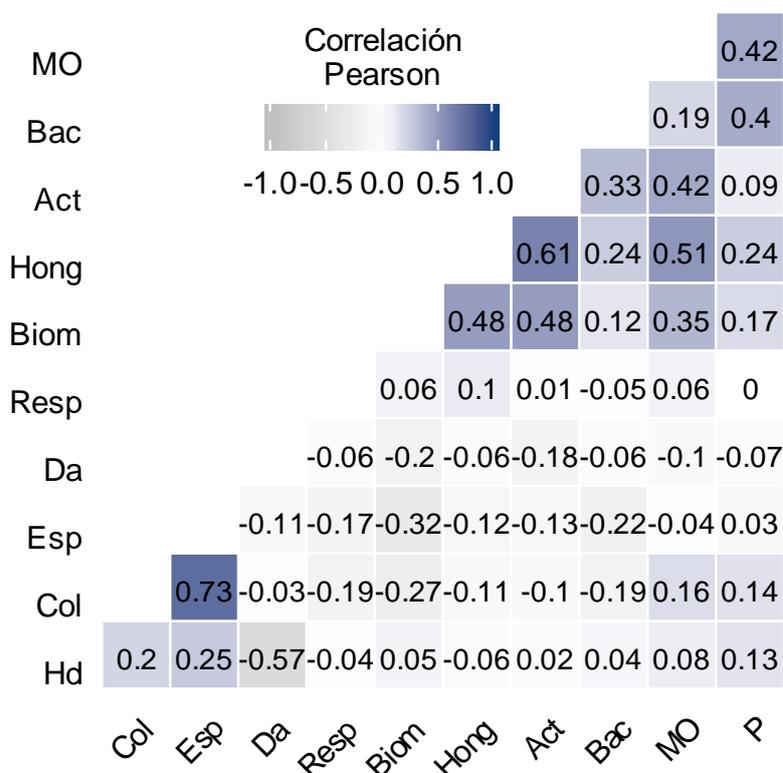


Figura 8. Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre las variables biológicas, físicas y químicas

4.2.2. Ponderación de los indicadores de la calidad del suelo

La Tabla 4 presenta el Análisis de Componentes Principales (ACP) con las cinco primeras dimensiones o componentes principales (CP) seleccionadas y sus ponderaciones específicas (Pe). Cabe resaltar que el objetivo del ACP es solo aportar ponderaciones, no reducir el número de variables. Se incluyó el CP 5, a pesar de tener 0.99 de auto valor debido a que tenía la mayor contribución de la variable respiración. El porcentaje de varianza acumulada hasta el CP cinco fue de 77.27%.

Tabla 4. Análisis de Componentes Principales y Ponderación específica para cada CP

Indicador	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP5
Auto valor	2.896	2.092	1.39	1.134	0.988
% Variancia	26.331	19.017	12.636	10.308	8.978
% V. acumulada	26.331	45.348	57.984	68.293	77.271
Pe	34.08	24.61	16.35	13.34	11.62

En la Figura 9, se observa las contribuciones de todas las variables al CP 1 y CP 2. La mayor contribución al PC 1 fue de la población de hongos, actinobacterias, biomasa microbiana y materia orgánica (color anaranjado claro), para el CP 2 fue del porcentaje de colonización de HMA, número de esporas de HMA (color anaranjado fuerte); las demás variables contribuyen más a los otros CP (Anexo 2).

Tabla 5. Ponderaciones finales para cada variable (Pv)

Variabes	Pv
Infeción micorrizica	0.101
Número de Esporas	0.094
Población de Bacterias	0.089
Población Hongos	0.087
Población Actinomicetos	0.085
Respiración	0.107
Biomasa microbiana	0.076
Densidad aparente	0.095
Humedad gravimétrica	0.093
Materia orgánica	0.081
Fósforo disponible	0.094

Las ponderaciones para cada variable (Pv) se observan en la tabla 5. En el biplot de la figura 9, se observa la contribución de cada variable a los CP 1 y 2, principalmente la población de hongos y actinomicetos, materia orgánica, biomasa microbiana, colonización micorrízica y número de esporas de HMA. Las demás variables contribuyen más a los CP 3, la densidad aparente y humedad gravimétrica, CP 4, la población de bacterias y el fósforo disponible, y al CP 5 la respiración (Anexo 2).

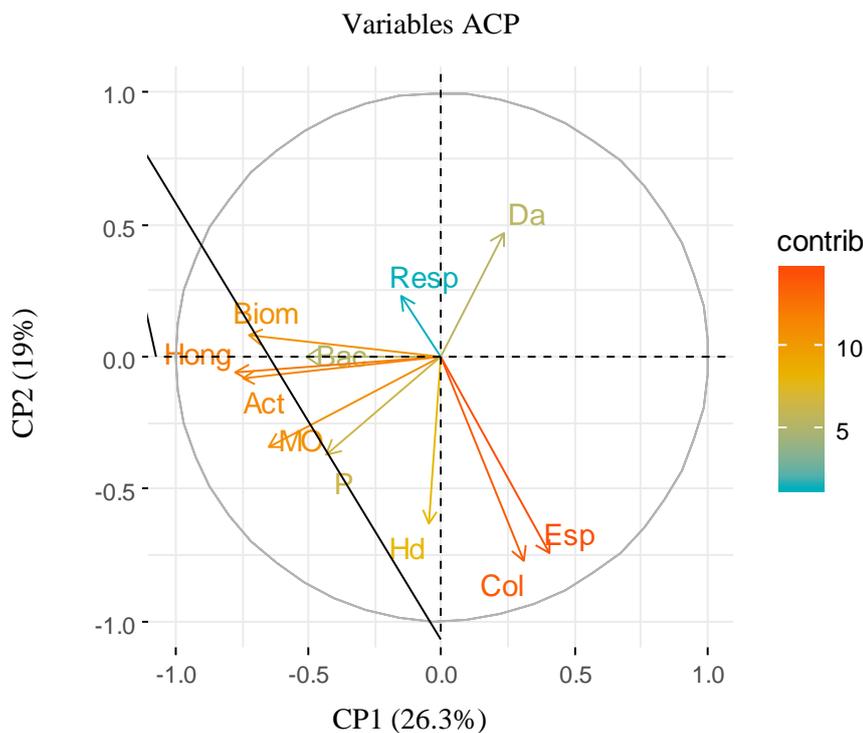


Figura 9. Biplot de las contribuciones al componente principal 1 y 2.

4.2.3. Índice de calidad del suelo ponderado (ICS_w)

El análisis de varianza demostró que los sistemas agroforestales produjeron efectos significativamente diferentes en el ICS_w (Anexo 5). Las calificaciones del ICS_w calculados utilizando ponderaciones se presentan en la Tabla 5. Si bien, las calificaciones obtenidas son muy bajas, comparado con los obtenidos por Buyer et al. (2017), se observaron diferencias significativas entre sistemas agroforestales según la ubicación de muestreo y profundidad. Existen diferencias significativas entre los SAF y la pastura (T). El ICS_w fue mayor para los SAF y menor para la pastura, en ambos lugares de muestreo y a diferentes profundidades. Se observó que a la altura de copa no existen diferencias significativas entre la profundidad de 0-5 cm y la de 5 a 15 cm (superior e inferior). A una profundidad de 0 a 5 cm el ICS_w es

mayor, tanto a la altura de copa como a la altura de camino; el SAF A en una profundidad inferior tiene el menor ICSw, lo cual puede deberse a que el SAF está compuesto por especie maderables de largo crecimiento (Figura 10). En la figura 11, se observan diferencias significativas entre la profundidad superior e inferior, siendo el ICSw mayor en los primeros cinco centímetros. A una profundidad superior el SAF A tiene la mayor calificación, seguido del SAF C, SAF B, SAF D y T respectivamente. A una profundidad inferior, el SAF A, SAF C y SAF D tiene la mayor calificación, y el T la menor. Los índices obtenidos para el SAF D a diferentes profundidades y en diferentes lugares de muestreo fueron menores que los demás SAFs, pero no lo suficiente para ser diferente significativamente.

En general, los índices obtenidos por los SAFs fueron bajos, y ya que la mayoría de indicadores evaluados fueron microbianos. Los indicadores colonización de micorrizas y número de esporas de HMA, fueron considerados en este estudio como negativos (mayor es peor) al entender que su simbiosis es característico de suelos infértiles y de condiciones agrestes para las plantas (Abbott y Robson, 1991; Ingleby et al., 1997). Por ello, es probable que los resultados favorecieron la obtención de índices mayores para los SAFs y menores para la pastura, ya que los HMA tuvieron mayor presencia en la pastura. Sin embargo, es sabido que los HMA pueden aparecer en sistemas diversos como los SAFs y favorecer el crecimiento de las especies presentes (Gollotte & Tuinen, 2004). Ante ello, cabe resaltar que, para la instalación de los SAFs, fue necesario la aplicación de un herbicida para la pastura, y posteriormente se incluyó una mínima aplicación de insumos químicos para controlar las malezas y ciertas plagas como la *Hypsipyla grandella* en caoba. La perturbación del suelo puede influir directamente en la presencia de HMA (Cardoso y Kuyper, 2006; Jasper, Abbott, y Robson, 2016), tal como encontró Jasper, Abbott, y Robson, (2016) donde la colonización micorrízica de las raíces de las especies en un suelo forestal se redujo casi a la mitad, y en una pastura no se redujo después de que los suelos habían sido alterados.

Tabla 6. Efecto de los tratamientos sobre el indicador de calidad del suelo ponderado (ICS w)

Tratamientos	Altura de copa				Altura de camino			
	Superior		Inferior		Superior		Inferior	
	ICS w	Coefficiente Var. (%)	ICS w	Coefficiente Var. (%)	ICS w	Coefficiente Var. (%)	ICS w	Coefficiente Var. (%)
SAF A	0.46±0.03a	21	0.33±0.01ab	9	0.47±0.02a	15	0.36±0.01a	10
SAF B	0.43±0.02a	15	0.34±0.02a	14	0.41±0.02ab	16	0.33±0.01ab	9
SAF C	0.44±0.02a	14	0.36±0.01a	9	0.45±0.03ab	17	0.36±0.01a	9
SAF D	0.40±0.01a	8	0.35±0.01a	7	0.39±0.01b	7	0.36±0.01a	8
T	0.22±0.02b	21	0.29±0.01b	13	0.21±0.02c	22	0.3±0.01b	11
Tratamiento	***		**		***		***	
Bloque	**		n.s.		**		.	

*Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

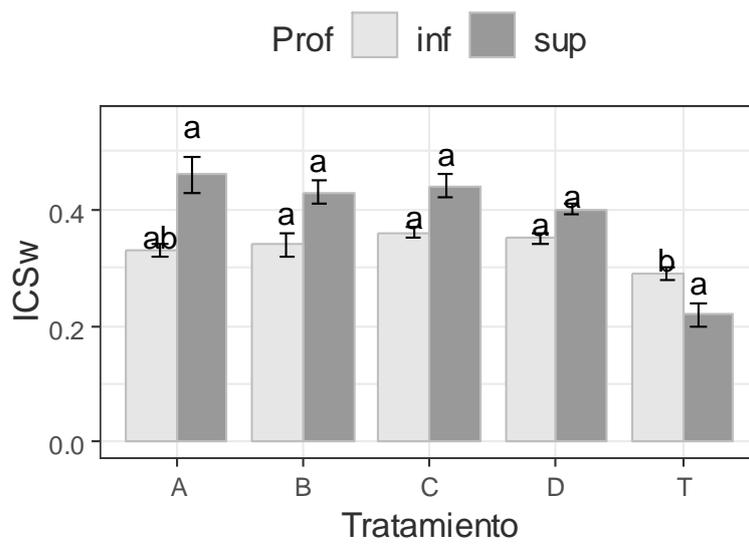


Figura 10. Índice de Calidad del suelo en la ubicación de copa.

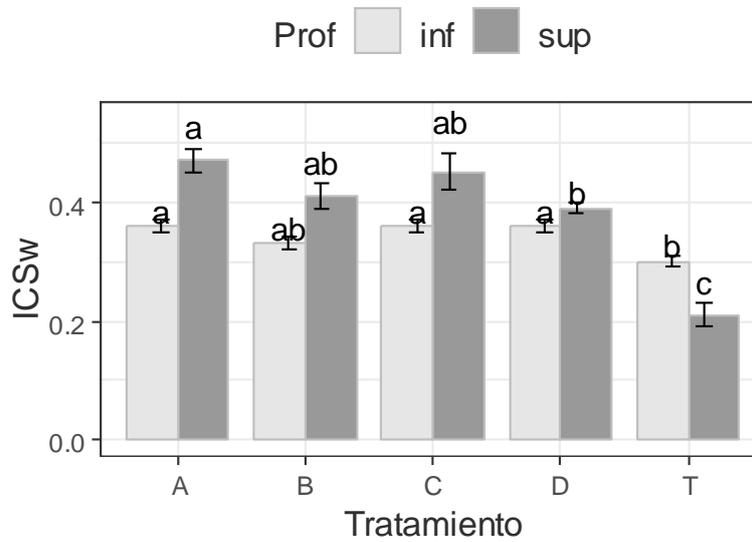


Figura 11. Índice de Calidad del suelo en la ubicación de camino.

4.3. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE LAS VARIABLES BIOLÓGICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS

4.3.1. Colonización y esporas de HMA

Los porcentajes de colonización de HMA de las raíces de las diferentes especies que componen los SAF A, B, C y D no difirieron entre sí, no superaron en promedio el 1% y fueron menores a lo observado para la pastura cuyo promedio fue 39%.

Los números promedio de esporas de HMA en 100g de suelo de los diferentes SAF no difirieron entre sí, manteniéndose en un rango de 16.3 a 42, menor a lo observado para la pastura con 519.5.

Se encontraron diferencias significativas entre la profundidad superior (0-5cm) y la inferior (5-15cm) tanto para la colonización de HMA como para el numero de esporas. No hubo diferencias significativas entre los lugares de muestreo copa y camino. Diferente a lo encontrado en el trabajo de Birhane et al. (2017), donde la colonización de HMA fue significativamente mayor en los casos de las parcelas agrícolas, praderas y bosques, en comparación con los de pasturas. Los HMA son considerados como indicadores de la fertilidad de los suelos sometidos a manejo agrícola sostenible debido a su susceptibilidad a las perturbaciones (Bending et al., 2004). Sin embargo, Cardoso y Kuyper (2006) mencionan que están asociados a sistemas poco fértiles, donde la necesidad de la simbiosis es mayor.

El aumento los HMA está relacionado con el aumento en las etapas de sucesión en un bioma de bosque seco tropical (Birhane et al., 2017), sin embargo, tres años de crecimiento de los SAFs es todavía poco tiempo para evaluarlo.

Según las referencias, las micorrizas mejoran potencialmente la calidad física del suelo mediante sus hifas externas así como las química del suelo a través de una mayor absorción de nutrientes y la calidad biológica del suelo a través de la red alimenticia del suelo (Cardoso & Kuyper, 2006), pero solo ocurren en suelos que necesitan esas mejoras; lo cual se obtuvo en esta investigación.

Tabla 7. Efecto de los sistemas agroforestales y la pastura sobre el porcentaje de Colonización y número de esporas de HMA

Variables	Colonización	Coef. Var. (%)	Esporas	Coef. Var. (%)
SAF A	0.94±0.25a	157.8	42±2.77a	39.6
SAF B	0.52±0.2a	235.17	26.58±2.83a	63.83
SAF C	0.66±0.26a	241.98	28.75±3.17a	66.23
SAF D	0.12±0.07a	347.95	16.33±2.07a	76.08
T	38.84±6.26b	96.79	519.5±41.04b	47.4

Tratamiento	***	***
Bloque	n.s.	n.s.

*Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

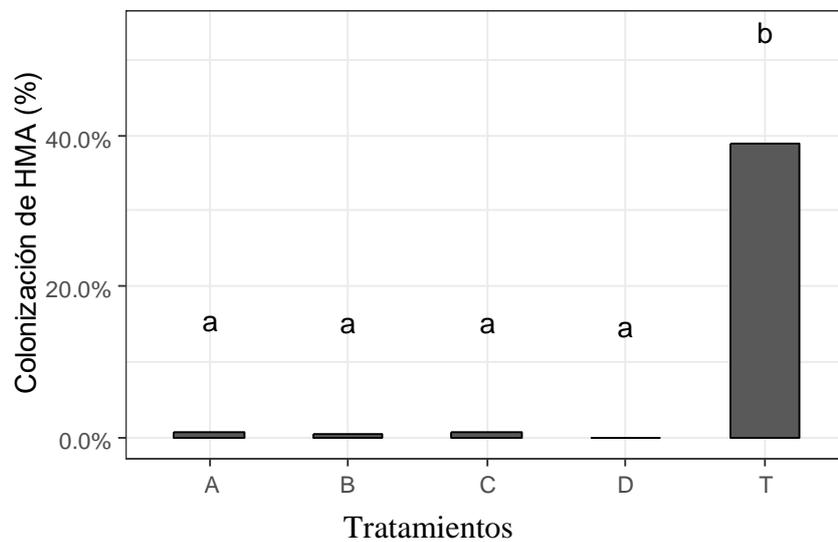


Figura 12. Efecto de los tratamientos sobre la colonización de raíces

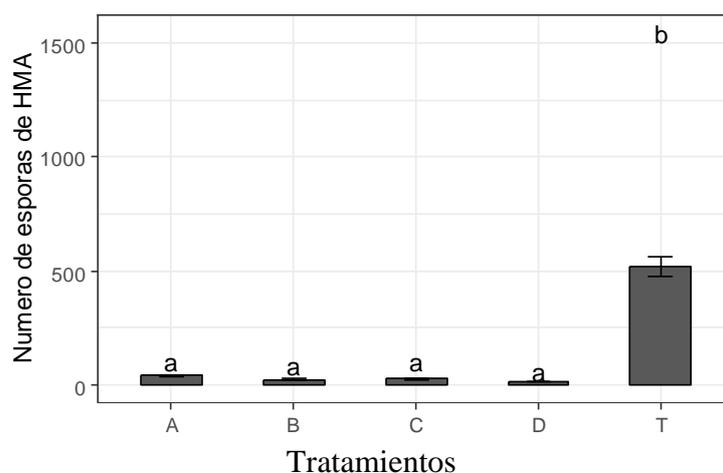


Figura 13. Efecto de los tratamientos sobre el número de esporas en el suelo

4.3.2. Población microbiana

El efecto de los sistemas agroforestales fue significativamente diferente al efecto de la pastura, sobre la población bacteriana (bacterias, hongos y actinomicetos) (Tabla 8) y (Anexo 8, 9 y 10). Buyer et al. (2017), encontró que los sistemas de manejo agroforestal y los cultivos de cobertura pueden alterar la estructura de la comunidad microbiana del suelo en zonas tropicales. En todos los estudios, el tamaño de la comunidad microbiana del suelo disminuyó significativamente después del pastoreo (Zhao et al., 2017), tal como se obtuvo en esta investigación. La población de bacterias fue mayor en el SAF C, la población de hongos y actinobacterias fue mayor en el SAF A (Figura 14). La diferencia puede deberse a la cobertura vegetal, y a las especies que componen los SAFs, tal como indica Wang et al. (2016), la hojarasca forestal es la sustancia principal de la fertilidad del suelo en el proceso de restauración de bosques y depende de los tipos de bosques y las especies de plantas relacionadas la cual tiene un impacto directo en los microorganismos del suelo.

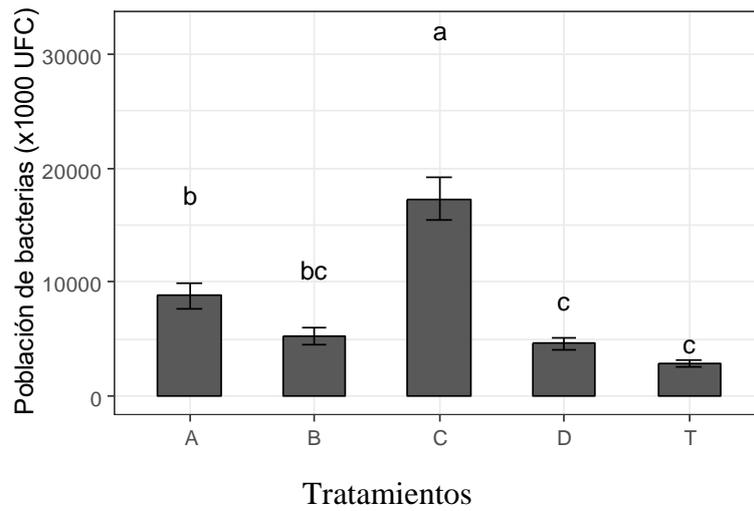


Figura 14. Efecto de los tratamientos sobre la población de Bacterias en el suelo

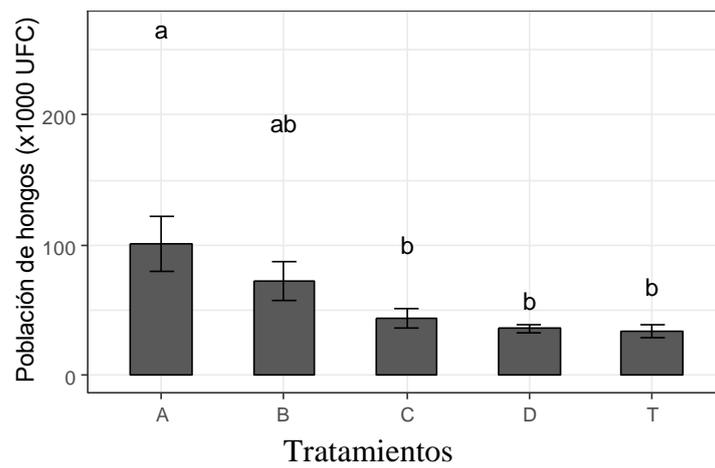


Figura 15. Efecto de los tratamientos sobre la población de hongos en el suelo

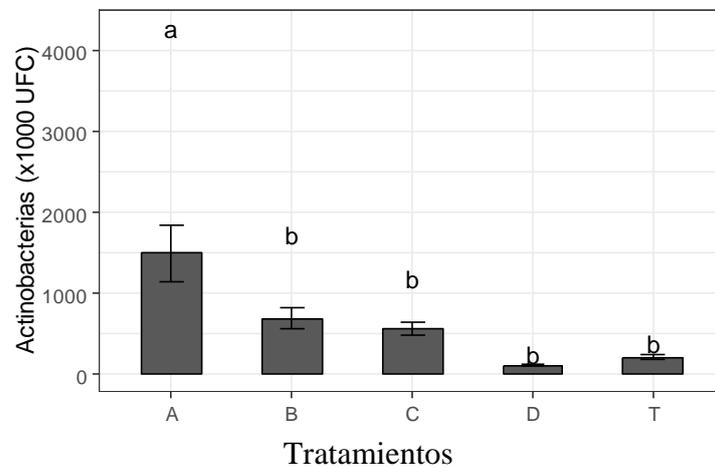


Figura 16. Efecto de los tratamientos sobre las actinobacterias en el suelo

Tabla 8. Efecto de los tratamientos sobre la población microbiana

Tratamientos	Bacterias	Coefficiente Var. (%)	Hongos	Coefficiente Var. (%)	Actinobacterias	Coefficiente Var. (%)
SAF A	8790.03± 1125.75b	76.84	100.86± 20.75a	123.46	1498.81 ±349.55a	139.93
SAF B	5320.22 ±738.57bc	83.29	72.36 ±15.3ab	126.88	688.92 ±131.05b	114.14
SAF C	17267.92 ±1858.41a	64.57	43.56 ±7.25b	99.94	560.17 ±81.42b	87.2
SAF D	4615.97 ±492.19c	63.98	36.03± 2.88b	47.97	113.11 ±17.77b	94.27
T	2878.61± 247.88c	51.67	33.83± 4.45b	78.92	212.56 ±23.17b	65.42
Tratamiento	***		***		***	
Bloque	.		**		***	

*Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

4.3.3. Respiración y biomasa microbiana

El análisis de variancia para ambas variables (Anexo 11 y Anexo 12) demostró que existen diferencia significativa entre los SAF y la T, debido a que, en los diversos microambientes de suelo influenciados por los tipos de uso de la tierra, los cambios en los índices microbianos como las capacidades respiratorias, la biomasa microbiana y los cocientes microbianos nos permiten monitorear las alteraciones en la estructura y función de la comunidad microbiana (Liu et al., 2017).

La tabla 9 presenta la comparación de medias en los sistemas evaluados, donde se observa que tanto la respiración como la biomasa de los SAF son ligeramente mayores que los valores observados para la pastura; en el caso de la biomasa, probablemente es debido a la mayor diversidad de plantas de los SAF en comparación con la pastura, ya que los exudados de las raíces de los árboles y la cobertura, junto con otros compuestos que contienen C del suelo se incorporan a la biomasa microbiana, lo que conduce a un mayor valor de ella.

Tabla 9. Efecto de los tratamientos sobre la respiración y biomasa microbiana

Variables	Respiración	Coefficiente Var. (%)	Biomasa microbiana	Coefficiente Var. (%)
SF A	0.07± 0.01 ab*	44.48	0.31± 0.03a	55.32
SF B	0.07 ±0.01 ab	80.9	0.26 ±0.03a	61.74
SF C	0.08± 0.01 a	42.46	0.17 ±0.02b	54.5
SF D	0.09 ±0.01 a	64.7	0.15±0.01bc	28.37
T	0.05 ±0 b	40.59	0.09± 0c	11.42
Tratamiento		**		***
Bloque		***		***

*Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

En particular, así como Buyer et al. (2017), encontró un aumento en la biomasa microbiana del suelo con cultivos de cobertura, Los SAF evaluados presentan mayor respiración y biomasa microbiana, contrario a lo que encontró Xu et al. (2017), a una profundidad de 0 a 10 cm, donde encontró mayores concentraciones de la biomasa microbiana en pasturas

sembradas (334 mg kg^{-1}) en comparación con silvopastura y pastizales nativos (193 y 232 mg kg^{-1} , respectivamente).

No se puede decir que existe una relación directa entre la respiración y la biomasa microbiana según los resultados obtenidos, pero si lo tiene con la población microbiana, ya que, los SAFs presentaron mayores valores de población y biomasa microbiana que la pastura degradada por sobrepastoreo.

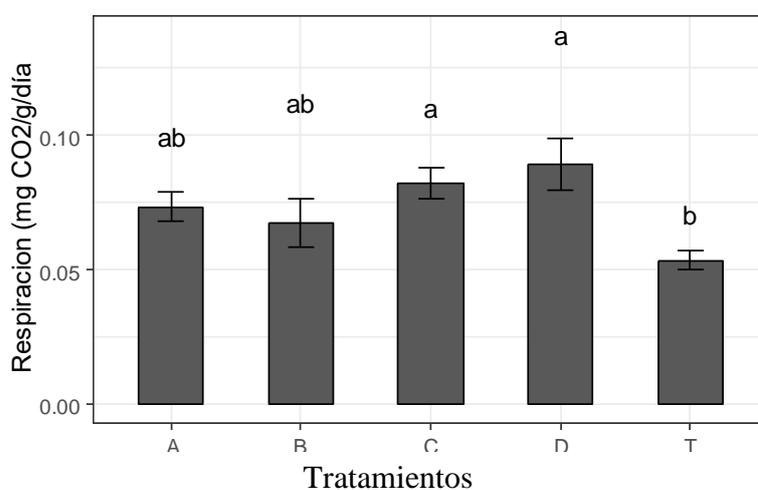


Figura 17. Efecto de los tratamientos sobre la respiración en el suelo

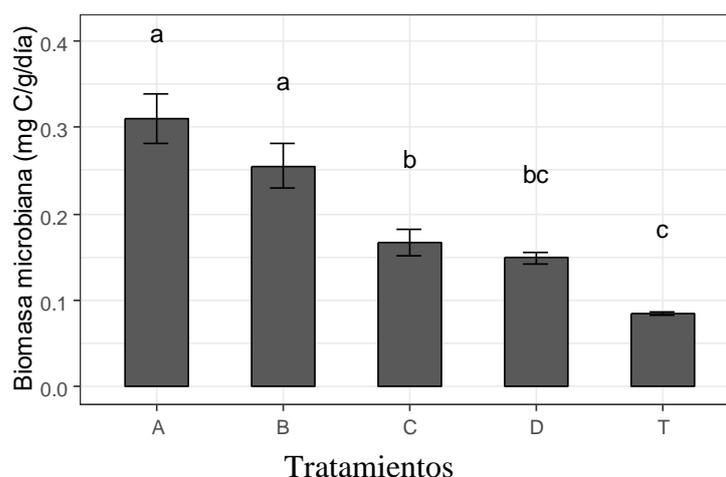


Figura 18. Efecto de los tratamientos sobre la biomasa microbiana en el suelo

4.3.4. Humedad gravimétrica (Hd) y Densidad aparente (Da)

El análisis de variancia para ambas variables (Anexo 13 y Anexo 14) demostró que existen diferencias significativas entre los SAFs y la T. El T presentó mayor humedad, pero mayor variabilidad porque estaba expuesto a pastos degradados y malezas de diferentes tipos, mientras que la humedad de los suelos con SAFs es menos variable porque estaban implementados con *Centrosema* como cobertura y los árboles. Es importante considerar que el muestreo se realizó en época seca, esperándose sea variable para época húmeda.

Los incrementos de DA se asocian al incremento de la compactación del suelo, que afecta las propiedades fundamentales de este y sus funciones (Sauer & Hernandez-ramirez, 2011). En esta investigación, la Da de SAF D que fue implementado con el Proyecto DATEM fue mayor que los SAF y la pastura, lo cual evidencia que un manejo inadecuado del SAF puede ser perjudicial para el suelo.

Tabla 10. Efecto de los tratamientos sobre la humedad gravimétrica y la densidad aparente

Tratamientos	Humedad gravimétrica	Coefficiente Var. (%)	Densidad aparente	Coefficiente Var. (%)
SAF A	13.2±0.55b*	24.92	1.38±0.02b	7.38
SAF B	16.21±1.07b	39.49	1.25±0.03c	15.79
SAF C	16.91±0.68ab	24.27	1.36±0.02bc	9.48
SAF D	14.6 ±0.66b	27.08	1.49±0.03a	10.33
T	20.37±1.78a	52.29	1.35±0.05bc	20.06
Tratamiento		***		***
Bloque		***		***

*Los valores dentro de una línea seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

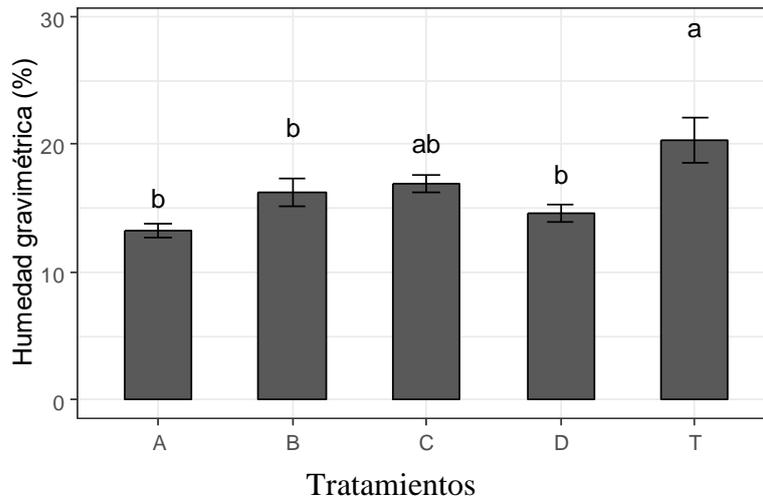


Figura 19. Efecto de los tratamientos sobre la humedad gravimétrica del suelo

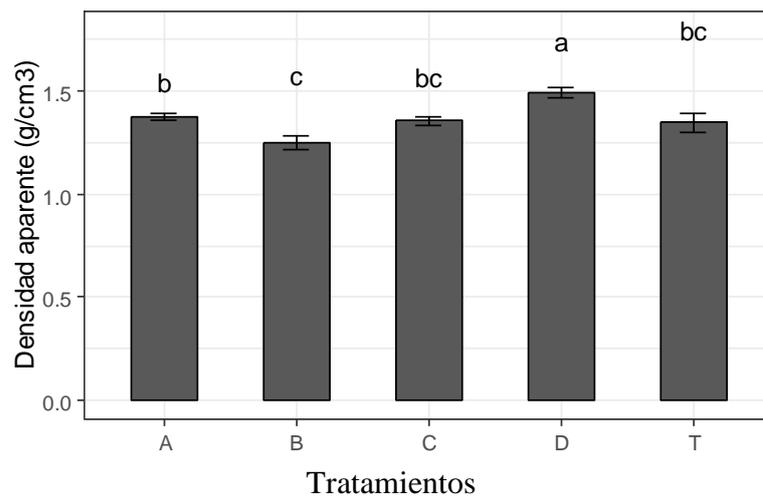


Figura 20. Efecto de los tratamientos sobre la densidad aparente del suelo

4.3.5. Materia orgánica (MO) y Fósforo (P)

El análisis de variancia para ambas variables (Anexo 15 y Anexo 16) demostró que no existen diferencias significativas entre los SAF y la T. La tabla 11 y las Figuras 21 y 22 presenta la comparación de medias en los sistemas evaluados. Los altos coeficientes de variabilidad y los niveles muy bajos de MO y P no permitieron ver diferencias significativas entre los SAFs y el T.

Estos indicadores no definieron claramente el estado del suelo y se mantuvieron estables, contrario a lo que encontró Estrada et al. (2017), donde el P, MO, K, y Mg evidenciaron una mayor fertilidad del suelo.

Tabla 11. Efecto de los tratamientos sobre la materia orgánica y el fósforo del suelo

Tratamiento	Materia Orgánica	Coefficiente Var. (%)	Fósforo disponible	Coefficiente Var. (%)
SF A	1.78 ±0.23 a	77.47	2.16± 0.23 a	62.95
SF B	1.88 ±0.2 a	64.52	3.13± 0.33 a	63.83
SF C	1.53 ±0.14 a	56.59	3.46 ±0.59 a	102.96
SF D	1.47± 0.16 a	64.86	2.47± 0.23 a	55.87
T	1.43 ±0.19 a	80.42	2.67 ±0.21 a	47.97
Tratamiento		n.s		.
Bloque		***		*

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

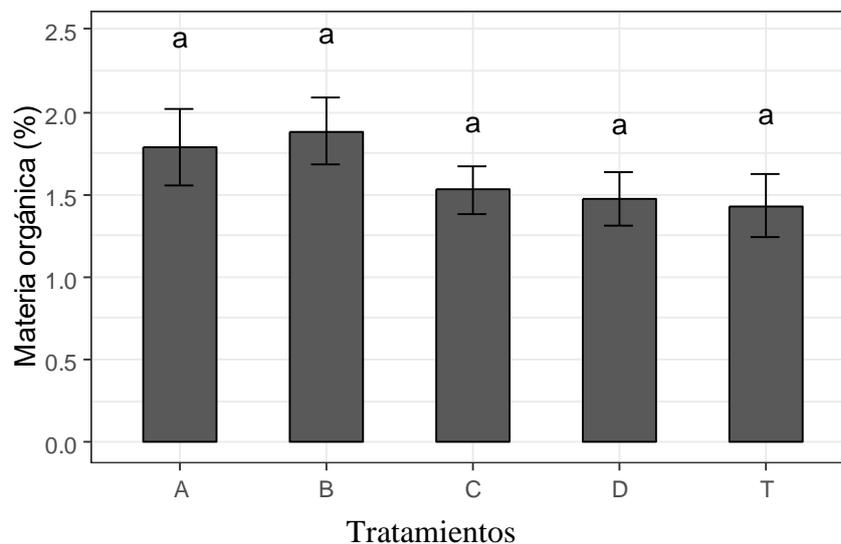


Figura 21. Efecto de los tratamientos sobre la Materia orgánica en el suelo

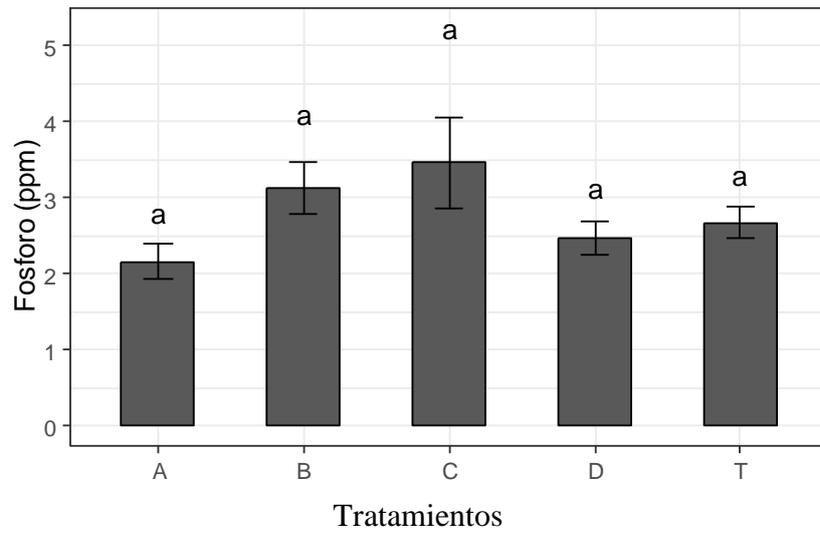


Figura 22. Efecto de los tratamientos sobre el fosforo disponible en el suelo

V. CONCLUSIONES

- Sí se cumplió la hipótesis, el Índice de Calidad del Suelo (ICS) fue mayor para los sistemas agroforestales (Sofás) que, para la pastura, lo cual indica que los Sofás sí mejoran la calidad del suelo; además, el SAF D no obtuvo menor ICS que los SAF A, SAF B y SAF C, a pesar de que los indicadores microbiológicos en el SAF D tuvieron menores valores.
- Los indicadores más influenciados por los Sofás fueron las esporas de HMA, la colonización micorrízica, la población de bacterias, actinobacterias y hongos, y la biomasa microbiana. La influencia de los Sofás A, B, C y D fue negativa para las esporas de HMA en el suelo, y la infección micorrízica en raíces; la influencia fue positiva para la biomasa microbiana por los Sofás A y B, y para la población de bacterias (por el SAF C), actinobacterias y hongos (por el SAF A); en comparación con la pastura.

VI. RECOMENDACIONES

- El análisis de colonización de micorrizas para especies arbóreas requiere un trabajo más detallista y cuidadoso para la conservación de las muestras y la posterior evaluación de la colonización (se sugiere separar las raíces por especies presentes en el sistema que se evalúa).
- Se sugiere evaluar el mismo número de variables físicas, químicas y biológicas, para poder establecer cuáles son las que representan mejor los cambios en la calidad del suelo.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Abbott, L. K., y Robson, A. D. (1991). Factors influencing the occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 35, 121–150.
- Alegre, J., Lao, C., Silva, C., y Schrevens, E. (2017). Recovering degraded lands in the Peruvian Amazon by cover crops and sustainable agroforestry systems. *Peruvian Journal of Agronomy*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.21704/pja.v1i1.1005>
- Anaya, M., y Jaramillo, D. (2017). Determination of two indices of soil quality. *Revista de La Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia*, 6, 102–123.
- Andrews, S.S., Karlen, D. L., y Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 90, 25–45.
- Andrews, Susan S, Mitchell, J. P., Mancinelli, R., Karlen, D. L., Hartz, T. K., Horwath, W. R., Petigrove, G., Scow, K. y Munk, D. S. (2002). On-Farm Assessment of Soil Quality in California' s Central Valley. *Agronomy Journal*, 94, 12–23.
- Arshad, M. A., y Coen, G. M. (2013). Characterization of soil quality : Physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, (October 2009). <https://doi.org/10.1017/S0889189300004410>
- Birhane, E., Aregawi, K., y Giday, K. (2017). Changes in arbuscular mycorrhiza fungi spore density and root colonization of woody plants in response to exclosure age and slope position in the highlands of Tigray , Northern Ethiopia. *Journal of Arid Environments*. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.03.002>
- Bünemann, E., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R., De Deyn, G., Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T., Mader, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Groenigen, J. y Brussaard, L. (2018). Soil Biology and Biochemistry. *ElSevier*, 120(January), 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

- Buyer, S., Baligar, V. C., He, Z., y Arévalo-gardini, E. (2017). Soil microbial communities under cacao agroforestry and cover crop systems in Peru, *120*(August), 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.009>
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., y Schiavo, H. F. (2007). Indicadores e índices. *Revista Del Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto*, *25*(2), 173–178.
- Cardoso, I. M., y Kuyper, T. W. (2006). Mycorrhizas and tropical soil fertility, *116*, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.011>
- Carter, M., Gregorich, E. G., Anderson, D. W., Doran, J. W., Janzen, H. H., y Pierce, F. J. (1995). Concepts of Soil Quality and their Significance (pp. 1–16).
- De la Paz, M., De la Horra, A., Pruzzo, L., y Palma, M. (2002). Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters. *Biol Fertil Soils*, *35*(4), 302–306. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0450-z>
- Doran, J. W., y Zeiss, M. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, *3*(11), 1433–1441. [https://doi.org/10.1016/S0024-3205\(98\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0024-3205(98)00082-4)
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz-Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., y Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad / Soil quality indicators to evaluate soil fertility. *Agrociencia*, *51*(8), 813. Retrieved from <http://bibliotecavirtual.unad.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S1405.31952017000800813&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Farrell, J., y Altieri, M. (2009). Sistemas Agroforestales. In *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable* (pp. 229–243). <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- García, Y., y Ramírez, W. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos : una nueva manera de evaluar este recurso Soil quality indicators : A new way to evaluate this resource, *35*(2), 125–138.

- Global Green Growth Institute, Deutsches Institut Für Entwicklungspolitik, y Servicio Nacional Forestal y de Fauna Salvaje. (2015). *Interpretación de la dinámica de la deforestación en el Perú y lecciones aprendidas para reducirla*.
- Gobierno Regional de Loreto, Municipalidad Provincial Alto Amazonas, y Instituto de Investigaciones de la Amazonía. (2015). *Zonificación Ecológica y Económica - ZEE de la provincia de Alto Amazonas, Departamento de Loreto*.
- Gollotte, A., y Tuinen, D. Van. (2004). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi colonising roots of the grass species *Agrostis capillaris* and *Lolium perenne* in a field experiment. *Mycorrhiza*, *14*, 111–117. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0244-7>
- Haggar, J., Pons, D., Saenz, L., y Vides, M. (2019). Agriculture , Ecosystems and Environment Contribution of agroforestry systems to sustaining biodiversity in fragmented forest landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *283*(June), 106567. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.06.006>
- Ingleby, K., Diagne, O., Deans, J. D., Lindley, D. K., Neyra, M., y Ducouso, M. (1997). Distribution of roots , arbuscular mycorrhizal colonisation and spores around fast-growing tree species in Senegal. *Forest Ecology and Management*, *90*(96), 19–27.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria (INEI). (2009). Pastos y Forrajes. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/%0Awww.inia.gob.pe/files/crianzas /pastos.pdf>
- Jasper, D. A., Abbott, L. K., y Robson, A. D. (2016). The Effect of Soil Disturbance on Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Soils from Different Vegetation Types Published by: Wiley on behalf of the New Phytologist Trust The effect of soil disturbance on vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in soils. *The New Phytologist*, *118*(3), 471–476.
- Jiménez, R., y González, V. (2006). La calidad de suelos como medida para su conservación, *13*(3), 125–138.
- Karlen, D. L., Andrews, S. S., y Doran, J. W. (2004). Soil quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, *74*, 1–40. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(01\)74029-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(01)74029-1)

- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., y Schuman, G. E. (1997). Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial).
- Larson, W. E., y Pierce, F. J. (1994). The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, y B. A. Stewart (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 37–52). Soil Science Society of America (SSSA).
- Liu, D., Huang, Y., An, S., Sun, H., Bhople, P., y Chen, Z. (2017). Catena Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients. *Catena*, (October), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.028>
- Luters, A., y Salazar, J. C. (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. USDA, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
- Montanarella, L., Pennock, D. J., McKenzie, N., Badraoui, M., Chude, V., Baptista, I., Mamo, T., Yemefack, M., Singh, M., Yagi, K., Young, S., Vijarnsorn, P., Zhang, G., Arrouays, D., Black, H., Krasilnikov, P., Sibicka, J., Alegre, J., Heriquez, C., Mendonca-Santos, M., Tobaada, M., Espinoza-Victoria, D., AlShankitI, A., AlaviPanah, S., El Mustafa, E., Hempel, J., Camps, M., Nachtergaele, F. y Vargas, R. (2016). World's soils are under threat. *Soil*, 2(1), 79–82. <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016>
- Nabiollahi, K., Taghizadeh-mehrjardi, R., y Eskandari, S. (2017). Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment. *Taylor y Francis*, 0340(September). <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1373188>
- Nair, P. K. (2014). Agroforestry : Practices and Systems. In *Enciclopedia de la agricultura y los sistemas alimentarios* (Vol. 1, pp. 270–282). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00021-8>
- Nielsen, M., y Winding, A. (2002). Microorganisms as indicators of soil health. National Environmental Research Institute Technical Report. Retrieved from <http://www.dmu.dk>

- ONDS, O. N. de D. y S.-. WILLAQNIKI, Situacion en la Amazonia Peruana: Realidad y perspectivas. (2013). Lima.
- Sarmiento, E., Fandiño, S., y Gómez, L. (2018). Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. *Ecosistemas*, 27(3), 130–139.
- Sauer, T. J., y Hernandez-ramirez, G. (2011). Thomas J. Sauer and Guillermo Hernandez-Ramirez. Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture (Vol. 3120, pp. 351–370). Nueva Zelanda: *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*. <https://doi.org/10.2136/2011.soilmanagement.c23>
- Tyler, E. J., Buol, S. W., y Sanchez, P. A. (1987). Genetic Association of Properties of Soils of an Area in the Upper Amazon Basin of Peru 1. In *Soil Science Society of America Journal* (pp. 771–776).
- Vallejo, V. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83–99. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>
- Wang, X., Yu, S., Zhou, L., y Fu, S. (2016). Acta Ecologica Sinica Soil microbial characteristics and the influencing factors in subtropical forests. *CHNAES*, 36(1), 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2015.12.004>
- Xu, S., Silveira, M. L., Inglett, K. S., Sollenberger, L. E., y Gerber, S. (2017). Geoderma Soil microbial community responses to long-term land use intensification in subtropical grazing lands. *Geoderma*, 293, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.019>
- Zhao, F., Ren, C., Shelton, S., Wang, Z., Pang, G., y Chen, J. (2017). Agriculture, Ecosystems and Environment Grazing intensity influences soil microbial communities and their implications for soil respiration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 249(July), 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.007>

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Análisis de caracterización de los suelos de los sistemas agroforestales y la pastura

Bloque	Profundidad (cm)	Ph (1:1)	CE (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	Sat de Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ meq/100g	Na ⁺	Al ⁺³ +H ⁺			
Pastura	0-15	3.62	0.09	0.00	1.27	4.7	31	79	12	9	Fr.A.	4.80	0.55	0.23	0.08	0.14	0.90	1.90	1.00	21
Pastura	15-30	3.65	0.06	0.00	1.16	3.9	24	71	16	13	Fr.A.	4.80	0.48	0.22	0.06	0.12	1.10	1.97	0.87	18
Washington	0-15	4.67	0.12	0.00	1.15	3.5	36	82	12	6	A.Fr.	4.16	1.36	0.25	0.13	0.20	0.20	2.14	1.94	47
Washington	15-30	4.20	0.03	0.00	0.74	2.1	22	66	16	18	Fr.A.	3.20	1.07	0.13	0.08	0.45	0.80	2.54	1.74	54
Roberto	0-15	4.59	0.13	0.00	2.22	3.8	37	70	18	12	Fr.A.	4.16	1.69	0.30	0.12	0.14	0.30	2.55	2.25	54
Roberto	15-30	4.07	0.05	0.00	0.92	2.1	25	62	18	20	Fr.Ar.A.	4.80	1.20	0.12	0.14	0.10	1.50	3.06	1.56	33
Clais	0-15	3.59	0.12	0.00	2.01	4.3	56	60	24	16	Fr.A.	4.80	0.86	0.10	0.16	0.09	2.60	3.81	1.21	25
Clais	15-30	3.77	0.05	0.00	0.78	1.1	39	50	30	20	Fr.	6.40	0.69	0.08	0.11	0.08	2.80	3.76	0.96	15
Pedamal	0-15	4.59	0.05	0.00	2.03	5.9	38	76	16	8	Fr.A.	3.52	1.46	0.12	0.09	0.11	0.25	2.03	1.78	51
Pedamal	15-30	4.41	0.02	0.00	0.55	1.3	22	62	20	18	Fr.A.	3.84	1.18	0.10	0.07	0.10	0.40	1.84	1.44	38

A = Arena; A.Fr. = Arena Franca; Fr.A. = Franco Arenoso; Fr. = Franco; Fr.L. = Franco Limoso; L = Limoso; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso; Fr.Ar. = Franco Arcilloso; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso; Ar.A. = Arcillo Arenoso; Ar.L. = Arcillo Limoso; Ar. = Arcilloso

Anexo 2. Contribuciones de cada variable para los cinco componentes principales evaluados

Variables	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
Colonización	3.35	28.41	9.40	2.64	0.44
Esporas	5.57	26.59	2.94	3.55	0.00
Bacterias	9.03	0.00	0.80	41.58	1.09
Hongos	20.69	0.18	3.15	8.14	0.03
Actinomicetos	19.43	0.34	0.10	6.32	8.00
Respiración	0.77	2.52	4.33	3.65	73.79
Biom. microbiana	18.06	0.30	2.47	5.40	1.80
Densidad aparente	1.86	10.57	38.13	0.04	0.10
Humedad gravim.	0.09	19.07	26.28	2.07	0.03
Materia orgánica	14.69	5.53	6.35	1.46	4.24
Fosforo	6.47	6.47	6.03	25.15	10.48
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Anexo 3. Ponderaciones específicas y ponderación final para cada variable

Variables	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Ponderación
Colonización	0.011	0.070	0.015	0.004	0.001	0.101
Esporas	0.019	0.065	0.005	0.005	0.000	0.094
Bacterias	0.031	0.000	0.001	0.055	0.001	0.089
Hongos	0.070	0.000	0.005	0.011	0.000	0.087
Actinomicetos	0.066	0.001	0.000	0.008	0.009	0.085
Respiración	0.003	0.006	0.007	0.005	0.086	0.107
Biom. microbiana	0.062	0.001	0.004	0.007	0.002	0.076
Densidad aparente	0.006	0.026	0.062	0.000	0.000	0.095
Humedad gravim.	0.000	0.047	0.043	0.003	0.000	0.093
Materia orgánica	0.050	0.014	0.010	0.002	0.005	0.081
Fosforo	0.022	0.016	0.010	0.034	0.012	0.094

Anexo 4. Estadísticos del análisis de comparación de medias Tukey de los Índices de Calidad del Suelo (ICS_w)

Sistema	Profundidad	Ubicación	ICS_w	Grupo	sd	se	Ci
A	superior	copa	0.46	a	0.09	0.03	0.07
B	superior	copa	0.43	a	0.06	0.02	0.05
C	superior	copa	0.44	a	0.06	0.02	0.05
D	superior	copa	0.40	a	0.03	0.01	0.02
T	superior	copa	0.22	a	0.05	0.02	0.04
A	inferior	copa	0.33	ab	0.03	0.01	0.02
B	inferior	copa	0.34	a	0.05	0.02	0.04
C	inferior	copa	0.36	a	0.03	0.01	0.03
D	inferior	copa	0.35	a	0.03	0.01	0.02
T	inferior	copa	0.29	b	0.04	0.01	0.03
A	superior	camino	0.47	a	0.07	0.02	0.05
B	superior	camino	0.41	ab	0.06	0.02	0.05
C	superior	camino	0.45	ab	0.08	0.03	0.06
D	superior	camino	0.39	b	0.03	0.01	0.02
T	superior	camino	0.21	c	0.05	0.02	0.04
A	inferior	camino	0.36	a	0.03	0.01	0.03
B	inferior	camino	0.33	ab	0.03	0.01	0.02
C	inferior	camino	0.36	a	0.03	0.01	0.02
D	inferior	camino	0.36	a	0.03	0.01	0.02
T	inferior	camino	0.30	b	0.03	0.01	0.03

Anexo 5. ANOVA de los Índices de Calidad del Suelo ponderado

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
ICS cs					
Tratamiento	4	0.35149	0.08787	27.6496	0.00000000008468***
Bloque	2	0.04007	0.02003	6.3038	0.004323**
Residuos	38	0.12077	0.003178		
ICS ci					
Tratamiento	4	0.02440	0.00610	5.0502	0.002305**
Bloque	2	0.004997	0.0024985	2.068	0.14044
Residuos	38	0.045911	0.00120		
ICS cas					
Tratamiento	4	0.386	0.096	35.816	0.00000000002054***
Bloque	2	0.039	0.020	7.256	0.002143**
Residuos	38	0.102	0.003		
ICS cai					
Tratamiento	4	0.026	0.007	7.358	0.000172***
Bloque	2	0.005	0.003	2.945	0.064705.
Residuos	38	0.034	0.001		

Anexo 6. ANOVA de la Colonización de HMA

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	42208	10552.1	36.7565	<2e-16***
Bloque	2	12	5.8	0.0202	0.98
Residuales	173	49665	287.1		

Anexo 7. ANOVA del Numero de esporas de HMA

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	6957513	1739378	139.451	<2e-16***
Bloque	2	2370	1185	0.095	0.9094
Residuales	173	2157832	12473		

Anexo 8. ANOVA de la población de bacterias

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	4720527425	1180131856	30.0477	<0.00000000000000002***
Bloque	2	223782788	111891394	2.8489	0.06063.
Residuales	173	6794616462	39275240		

Anexo 9. ANOVA de la población de Hongos

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	119394	29849	5.918	0.0001736***
Bloque	2	66920	33460	6.634	0.0016751**
Residuales	173	872558	5044		

Anexo 10. ANOVA de la población de actinobacterias

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	43323703	10830926	11.361	0.00000003287***
Bloque	2	20086376	10043188	10.535	0.00004817***
Residuales	173	164930478	953355		

Anexo 11. ANOVA de la respiración microbiana

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	0.027414	0.0068536	4.5269	0.001675**
Bloque	2	0.053808	0.0269039	17.7704	0.00000009571***
Residuales	173	0.261917	0.001514		

Anexo 12.ANOVA de la biomasa microbiana

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	1.15061	0.287652	26.785	0.00000000000000022***
Bloque	2	0.40033	0.200167	18.639	0.00000004671***
Residuales	173	1.85789	0.010739		

Anexo 13.ANOVA de la humedad gravimétrica

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	1059.6	264.9	7.4955	0.00001365***
Bloque	2	806	402.98	11.4026	0.00002229***
Residuales	173	6114	35.34		

Anexo 14.ANOVA de la densidad aparente

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	1.0988	0.274702	9.3765	0.0000006978***
Bloque	2	0.6246	0.312276	10.6591	0.00004311***
Residuales	173	5.0683	0.029297		

Anexo 15.ANOVA de la Materia orgánica

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	5.79	1.4474	1.2192	0.3044368
Bloque	2	17.359	8.6794	7.3109	0.0008954***
Residuales	173	205.384	1.1872		

Anexo 16.ANOVA del fósforo

Fuente de variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P valor
Tratamiento	4	38.77	9.6926	2.2611	0.06453.
Bloque	2	29.36	14.6791	3.4243	0.0348*
Residuales	173	741.6	4.2867		

Anexo 17. Fotos



A

A) Sistema agroforestal (SAF)



B

B) Toma de muestras para Da



C

C) Raíces de las especies de los SAFs



D

C) Colección de muestras, separación de la cobertura



E

E) Decoloración y tinción de raíces para el análisis de colonización de HMA



F

F) Preparación de raíces para visualización en el estereoscopio



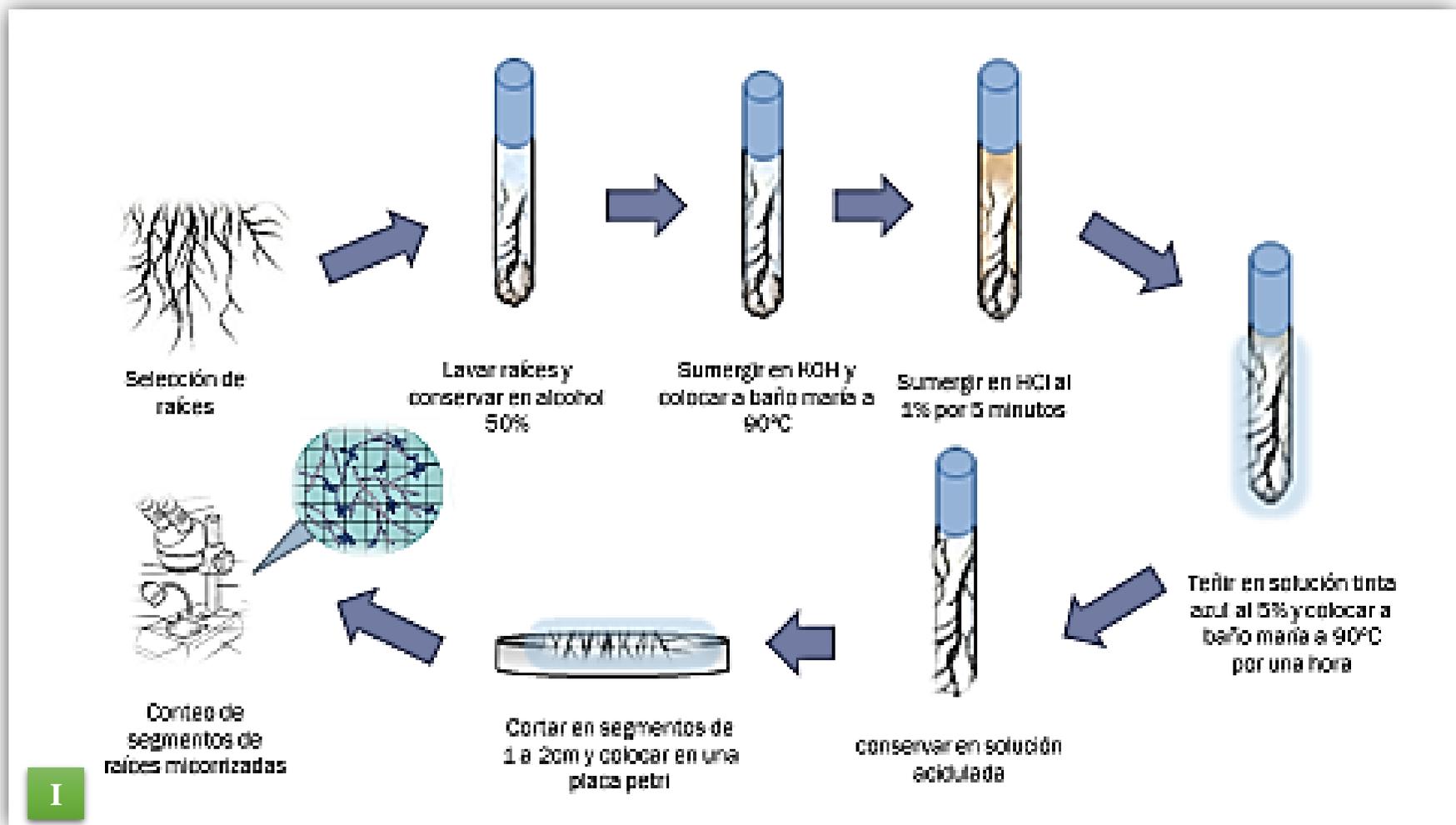
G

G) Raíces seleccionadas



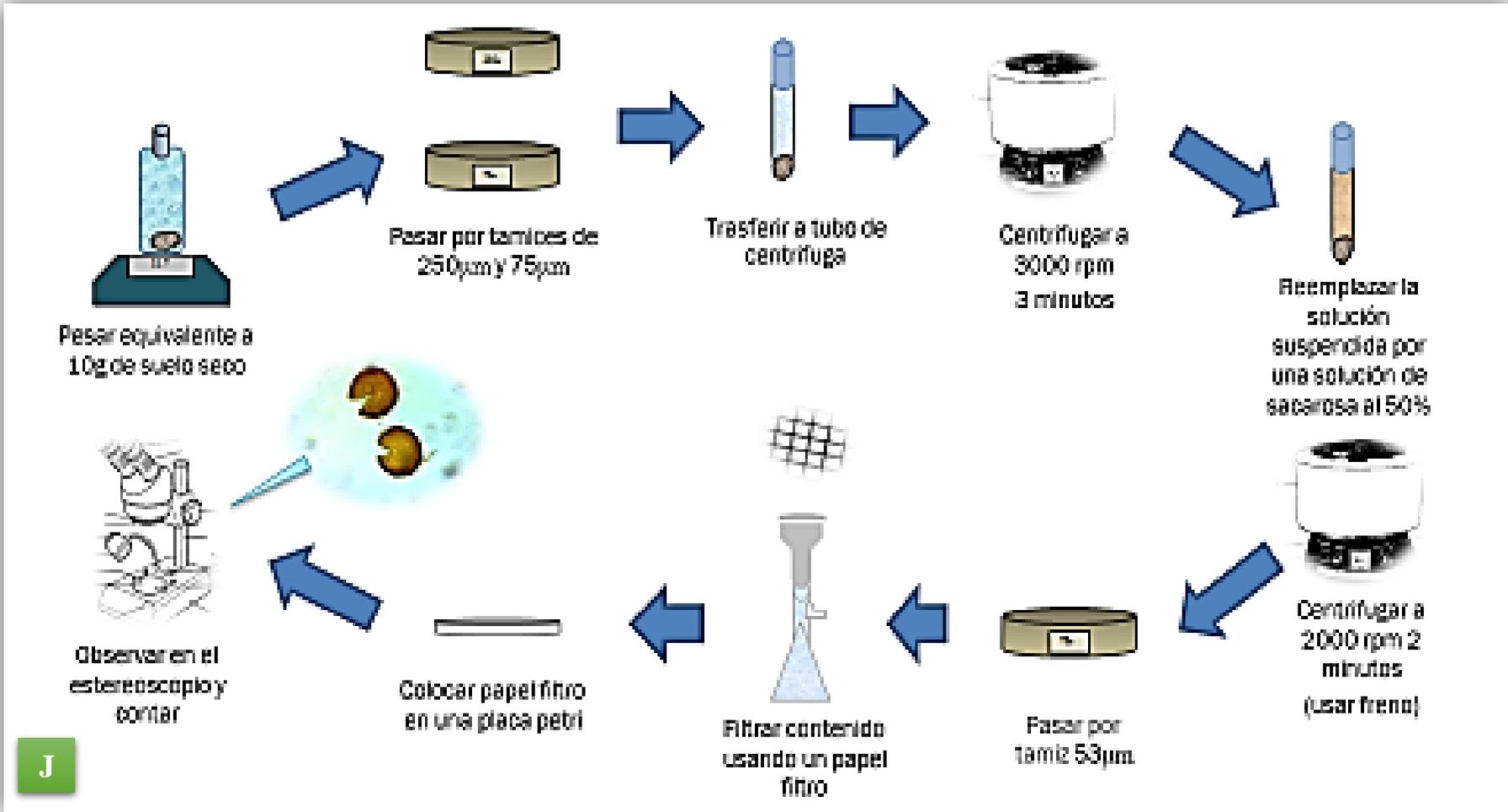
H

H) Visualización de hifas de HMA



I

I) *Flujograma del análisis de colonización de HMA*



J

J) Flujograma del análisis de esporas de HMA



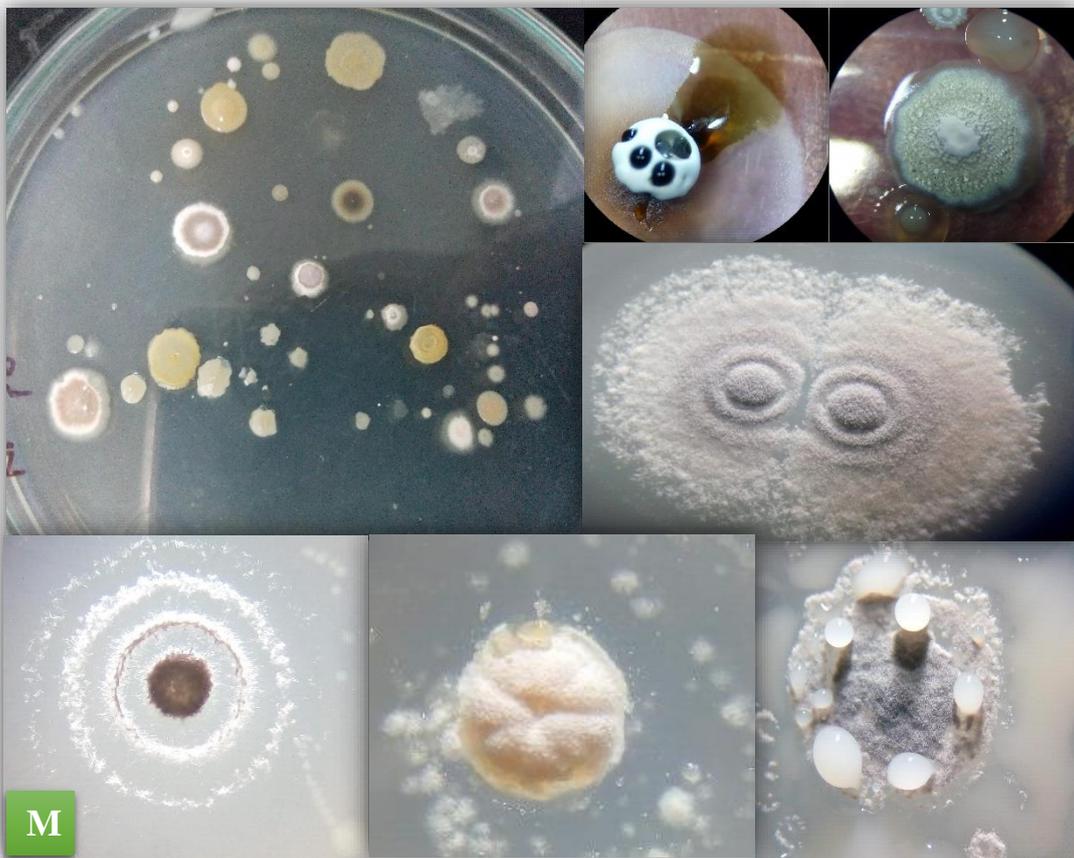
K

K) Conteo de hongos



L

L) Conteo de bacterias



M

M) Visualización de actinomicetos