UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍAS EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR, MODALIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

"Evaluación edafoclimática y cobertura arbórea en tres sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*. L) en Cananvalle, provincia de Imbabura"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero forestal.

Línea de investigación: Desarrollo agropecuario y forestal sostenible

Autor: Anahí Esmeralda Liquinchano Quiranza

Director: Ing. Mario José Añazco Romero PhD.

Ibarra -Ecuador-2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Liquinchano Quiranza Anahí Esmeralda

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Evaluación edafoclimática y cobertura arbórea en tres sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*. L) en Cananvalle, provincia de Imbabura"
AUTOR (ES):	Liquinchano Quiranza Anahí Esmeralda
FECHA: DD/MM/AAAA	08/07/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ▭ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Forestal
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Mario José Añazco Romero PhD. Ing. Hugo Vinicio Vallejos Álvarez MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 8 días del mes de julio de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ANAHI ESMERALDA LIQUINCHANO QUIRANZA

(Firma)……
Nombre: Liquinchano Quiranza Anahí Esmeralda

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 8 de julio de 2026

Ing. Mario José Añazco Romero PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MARIO JOSE ANAZCO ROMERO

(f) ……
Ing. Mario José Añazco Romero PhD.

*C.C.:*0701574329

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular **"**Evaluación edafoclimática y cobertura arbórea en tres sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*. L) en Cananvalle, provincia de Imbabura**"** elaborado por Liquinchano Quiranza Anahí Esmeralda, previo a la obtención del título del Ingeniero Forestal, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MARIO JOSE ANAZCO ROMERO

(f):…….
Ing. Mario José Añazco Romero PhD.
C.C.: 0701574329

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
HUGO VINICIO VALLEJOS ALVAREZ

(f):…….
Ing. Hugo Vinicio Vallejos Álvarez MSc.
C.C.1002018941

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mis padres Mesias Liquinchano y María Quiranza quienes me enseñaron a perseverar y seguir adelante día tras día, aún con lágrimas en los ojos. Su amor, guía y valentía fueron esenciales dentro de este largo camino.

A Dios, porque la oración siempre ha sido mi refugio para hallar consuelo y conectar lasos con mi abuelita María Luisa De la Cruz+, este logro alcanzado también es por ella.

Un agradecimiento especial a mis sobrinos y sobrinas, quienes en su inocente complicidad realizaban tareas de campo a mi lado. Sus ocurrencias y risas hacían que mi día se llene de vida encontrando alivio.

A mis hermanas Jazmín y Carmita, y a mis hermanos Darwin y Josué gracias por creer en mí, por no dejarme sola, ver su constancia y fuerza me inspiró a no rendirme.

A Jardiel, gracias mi amor por siempre estar presente y animarme cuando simplemente el cansancio se quiere apoderar de todo.

Mi título representa a cada una de las personas que me dio su aliento, apoyo y guía desde mi infancia, en él se refleja la confianza brindada por todas las personas, que de una u otra forma contribuyeron a que este sueño se haga realidad.

AGRADECIMIENTO

A la gloriosa Universidad Técnica del Norte por haberme abierto las puertas de la educación superior por brindarme más que conocimiento las herramientas necesarias para convertirme en Ingeniera Forestal.

Resalto mi admiración, agradecimiento y estima a mi director PhD. Mario José Añazco, quien con su experiencia fortaleció mi proyecto de titulación. Gracias por confiar en mi capacidad de investigación y orientarme con sabiduría y paciencia en este largo trayecto.

A mi asesor MSc. Hugo Vallejos y biometrista MSc. Guillermo Varela por su claridad, su disposición y su valioso apoyo técnico y académico. Su conocimiento y experiencia fue una pieza clave para dar este trabajo solidez y precisión.

Un agradecimiento especial a mis amigas Leslie, Fernanda y Alisson, por cada momento y recuerdo compartido. Por compartir conocimientos, experiencias y anécdotas. Gracias por esa amistad que solo ustedes conocen.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación evaluó la relación entre la cobertura arbórea, las propiedades edáficas y las condiciones microclimáticas en tres sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.) establecidos en Cananvalle, provincia de Imbabura, Ecuador. El objetivo fue caracterizar las condiciones edafoclimáticas y cuantificar los niveles de sombra generados por diferentes especies arbóreas asociadas al cultivo de café. Se realizó un censo en los tres sistemas agroforestales, donde se determinaron el porcentaje de sombra mediante un densiómetro esférico, la autosombra del cafeto mediante variables dasométricas y cálculos de área de copa, y las variables microclimáticas utilizando registros del INAMHI. Adicionalmente, se analizaron muestras de suelo para determinar pH, materia orgánica, propiedades físicas, macronutrientes y micronutrientes.

Los resultados permitieron diferenciar los tres sistemas agroforestales según sus niveles de cobertura. El componente arbóreo presentó porcentajes de sombra similares entre sistemas, con valores de 49,40 % (SAF1), 49,92 % (SAF2) y 50,18 % (SAF3). Sin embargo, al incorporar la auto sombra generada por el cafeto, la sombra total del sistema aumentó a 67,52 %, 77,61 % y 82,76 %, respectivamente. En cuanto a las propiedades edáficas, se observó que una mayor sombra total se asoció con incrementos en el pH, la materia orgánica y la porosidad, además de una correlación positiva fuerte con el calcio. En contraste, el fósforo, el azufre y varios micronutrientes presentaron correlaciones negativas, mientras que el nitrógeno y el potasio no evidenciaron una relación con la sombra. Respecto a las condiciones micro climáticas, la relación entre la sombra total y la temperatura fue débil y negativa, registrándose una ligera disminución de la temperatura conforme aumentó la cobertura, mientras que la humedad relativa presentó una correlación positiva fuerte, indicando que los sistemas con mayor sombra tienden a conservar una mayor humedad ambiental durante los periodos de lluvia.

Se concluye que la cobertura arbórea constituye un componente determinante en la regulación de las condiciones edáficas y micro climáticas de los sistemas agroforestales evaluados, aportando información técnica para optimizar el manejo sostenible de cafetales bajo sombra en el norte del Ecuador.

Palabras clave: sistemas agroforestales, café, cobertura arbórea, propiedades edáficas, microclima.

ABSTRACT

This study evaluated the relationship between tree canopy cover, soil properties, and microclimatic conditions in three coffee-based agroforestry systems (*Coffea arabica* L.) established in Cananvalle, Imbabura Province, Ecuador. The objective was to characterize the edaphoclimatic conditions and quantify the shade levels generated by different tree species associated with coffee cultivation. A complete census was conducted in the three agroforestry systems. Tree shade was quantified using a spherical densitometer, while coffee self-shading was estimated through dendrometric measurements and crown area calculations. Microclimatic variables were obtained from records provided by the Ecuadorian National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI). In addition, soil samples were analyzed to determine pH, organic matter, physical properties, and macro- and micronutrient contents.

The results differentiated the three agroforestry systems according to their canopy cover. The tree component exhibited similar shade percentages among systems, with values of 49.40% (AFS1), 49.92% (AFS2), and 50.18% (AFS3). However, when coffee self-shading was incorporated, total system shade increased to 67.52%, 77.61%, and 82.76%, respectively. Regarding soil properties, greater total shade was associated with higher pH, organic matter content, and soil porosity, as well as a strong positive correlation with calcium. In contrast, phosphorus, sulfur, and several micronutrients showed negative correlations, whereas nitrogen and potassium exhibited no relationship with shade. Concerning microclimatic conditions, the relationship between total shade and air temperature was weakly negative, with a slight decrease in temperature as canopy cover increased. Conversely, relative humidity showed a strong positive correlation, indicating that systems with greater shade tended to retain higher atmospheric moisture during the rainy season.

It is concluded that tree canopy cover is a key component regulating the soil and microclimatic conditions of the evaluated agroforestry systems, providing valuable technical information to optimize the sustainable management of shaded coffee plantations in northern Ecuador.

Keywords: agroforestry systems, coffee, tree canopy cover, soil properties, microclimate.

LISTA DE SIGLAS

SAF: Sistema agroforestal.

CAP: Circunferencia a la altura del pecho.

DAP: Diámetro a la altura del pecho.

Dc: Diámetro de copa.

pH: Potencial de hidrógeno.

N: Nitrógeno.

P: Fósforo.

K: Potasio.

Ca: Calcio.

Mg: Magnesio.

MO: Materia orgánica.

USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR 3

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR 4

DEDICATORIA 5

AGRADECIMIENTO 6

RESUMEN EJECUTIVO 7

INTRODUCCIÓN 15

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN. 15

- *Problemática a investigar.* *15*
- *Formulación del problema de investigación.* *15*

JUSTIFICACIÓN 16

OBJETIVOS 17

OBJETIVO GENERAL 17

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN. 17

CAPÍTULO I 18

MARCO TEÓRICO 18

1.1CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS Y COBERTURA ARBÓREA 18

1.1.1. Definición e importancia del suelo *18*

1.1.2. Componentes del suelo *19*

1.1.3. Propiedades físicas y químicas del suelo. *20*

1.1.4. La Temperatura, humedad y precipitación. *21*

1.1.5 La cobertura arbórea sobre la materia orgánica y propiedades químicas del suelo. *22*

1.1.6. La cobertura arbórea sobre las condiciones micro climáticas. *23*

1.2. SISTEMAS AGROFORESTALES 24

1.2.1. Importancia de sistemas agroforestales. *24*

1.2.2. Componentes de sistemas agroforestales *25*

1.3 CAFÉ EN SISTEMAS AGROFORESTALES 26

1.3.1. Origen del café *26*

1.3.2. Desarrollo del café en sistemas agroforestales. *27*

1.4. ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LAS CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS Y COBERTURA ARBÓREA EN SISTEMAS AGROSILVOPASTORILES 28

1.4.1. Influencia de la cobertura arbórea en los componentes del suelo con cultivos de cafetal *28*

1.4.2. Influencia de la cobertura arbórea en las condiciones micro climáticas de tres sistemas agroforestales asociados con cultivos de café. *29*

CAPÍTULO II 31

MATERIALES Y MÉTODOS 31

2.1TIPO DE INVESTIGACIÓN SEGÚN LOS SIGUIENTES CRITERIOS 31

2.2.1. Política: *31*

2.2.2. Geografía del sitio investigación: *31*

2.3. CARACTERIZACIÓN EDAFOCLIMÁTICA DEL LUGAR 33

2.3.1. Suelo *33*

2.3.2. Clima *33*

2.4. MATERIALES, EQUIPOS Y SOFTWARE 33

2.5. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS 33

2.5.1. Universo-Población *33*
2.5.2. Censo *34*
2.5.3. Explicar el trabajo desarrollado en gabinete y campo. *34*
2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES 34
2.6.1. Definir la estructura de tres sistemas agroforestales que asocian una especie forestal con diferentes variedades de café. *34*
2.6.1.1. Caracterización 34
2.6.2. Determinar la auto sombra del cafeto en los sistemas agroforestales *37*
2.6.2.1. Auto sombra 37
2.6.2.2. Porcentaje de sombra existente en el sistema. 39
2.6.3. Relacionar los niveles de cobertura arbórea y auto-sombra con los cambios observados en las propiedades edáficas y condiciones micro climáticas. *40*
2.7. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS 41
CAPÍTULO III 42
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 42
3.1. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES DE FORMA ESTRUCTURAL..... 42
3.1.1. Distribución y densidad horizontal en componentes vegetales. *42*
3.1.2. Diversidad florística *44*
3.1.2. Sombra *45*
3.2. DETERMINACIÓN DE LA AUTO SOMBRA DEL CAFETO EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES 46
***3.2.1.* Análisis de área promedio de copa** 46
3.2.2 Porcentaje de auto sombra de café 47
3.2.3 Porcentaje de sombra total del sistema. 48
3.3. RELACIÓN DE NIVELES DE COBERTURA ARBÓREA Y AUTO SOMBRA CON LOS CAMBIOS OBSERVADOS EN LAS PROPIEDADES EDÁFICAS Y CONDICIONES MICRO CLIMÁTICAS. 50
3.3.1. El pH *50*
3.3.2. Materia orgánica *51*
3.3.3. Propiedades químicas *52*
3.3.3.1 Macronutrientes 52
3.3.3.2. Micronutrientes 54
3.3.4 Propiedades físicas *56*
3.3.4.1 Textura 56
3.3.4.2. Densidad aparente, densidad real y porosidad. 57
3.3.5. Relación entre niveles de sombra y parámetros edafológicos. *58*
3.3.5.1. Correlación entre la sombra y el pH del suelo 59
3.3.5.2. Correlación entre la sombra y la materia orgánica del suelo 60
3.3.5.3 . Correlación entre la sombra y los macro y micronutrientes del suelo 60
3.3.5.4. Correlación entre la sombra y las propiedades físicas del suelo 60
3.3.6. Parámetros climáticos *61*
3.3.7.1. Correlación entre la sombra y la temperatura, humedad y precipitación 67
CAPÍTULO IV 69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 69
CONCLUSIONES 69
RECOMENDACIONES 70
BIBIOGRAFÍA 71
ANEXOS 80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Ubicación georreferenciada de los tres sistemas agroforestales de Ibarra*.....32

Tabla 2 *Materiales, equipos y software empleados en la investigación.*.....33

Tabla 3 *Rangos de interpretación de los índices de Simpson y Shannon*.....35

Tabla 4 *Rangos de interpretación para el índice de Margalef*.....36

Tabla 5 *Matriz de registro de datos para caracterizar los sistemas agroforestales*.....36

Tabla 6 *Matriz para obtener el cálculo de sombra de las especies forestales*.....37

Tabla 7 *Matriz de autosombra de café*.....39

Tabla 8 *Composición florística de sistemas agroforestales en el predio Cananvalle.*.....42

Tabla 9 *Índice de diversidad de Shannon en tres sistemas agroforestales.*.....44

Tabla 10 *Porcentaje de sombra promedio en tres sistemas agroforestales (SAF) del componente arbóreo.*.....45

Tabla 11 *Porcentaje de autosombra del café en tres sistemas agroforestales.*.....47

Tabla 12 *Comparación de niveles de sombra en tres sistemas agroforestales del predio Cananvalle.*.....49

Tabla 13 *Niveles de potencial de hidrógeno en tres sistemas agroforestales.*.....50

Tabla 14 *Propiedades físicas de tres sistemas agroforestales del predio de Cananvalle.*.....57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	*Mapa de sistemas agroforestales Cananvalle, Ibarra-Imbabura*	32
Figura 2	*Distribución horizontal de especies arbóreas y cafetales dentro de tres sistemas agroforestales evaluados.*	43
Figura 3	*Comparación de diámetros promedio de copa de Coffea arabica en tres sistemas agroforestales.*	46
Figura 4	F4*Micronutrientes disponibles para el cultivo de café (Coffea arabica).*	52
Figura 5	*Micronutrientes disponibles para el cultivo de Coffea arabica.*	54
Figura 6	*Clases texturales de los diferentes sistemas agroforestales del predio Cananvalle.*	56
Figura 7	*Sombra total vs variables edafológicas.*	59
Figura 8	*Temperatura promedio de tres sistemas agroforestales*	61
Figura 9	*Humedad relativa promedio en tres sistemas agroforestales.*	63
Figura 10	*Precipitación promedio de tres sistemas agroforestales en cuatro periodos de tiempo.*	65
Figura 11	*Relación de sombra vs parámetros climáticos.*	67

INTRODUCCIÓN

Problema de investigación.

- ***Problemática a investigar.***

Existe escasa información de las características edafológicas y micro climáticas en cada sistema agroforestal, ubicados en Ibarra-Ecuador por la ausencia de un diagnóstico que integre estos parámetros. Actualmente, los sistemas agroforestales (SAF) se han catalogado como una estrategia de sostenibilidad para cultivos de café, sin embargo, los factores edafoclimáticos pueden influir de manera significativa en la salud del suelo, lo cual influye en el desarrollo del cafeto. De tal manera que es sumamente importante establecer niveles adecuados de cobertura arbórea dentro de cada uno de los sistemas.

En el suelo se percibe una deficiencia de macronutrientes además las condiciones edafológicas no se ajustan a las requeridas tradicionalmente para la producción del cafeto, lo cual incide negativamente con en el rendimiento del café. Situación que se deriva de una ausente evaluación que permita ajustar estas carencias.

En cuanto al microclima los abruptos cambios de temperatura, humedad ambiental, precipitación y la ausencia de un establecimiento adecuado de la sombra de las especies forestales podrían estar alterando el equilibrio de los factores climáticos adecuados. Escenario que se evidenció en la última época de verano.

El estudio se centró en la evaluación de los efectos de la sombra y auto sombra que influyen en los factores edafoclimáticos.

- *Formulación del problema de investigación.*

¿Cuál es el porcentaje de cobertura arbórea que influye en los factores edafoclimáticos de los sistemas agroforestales de Cananvalle, Ibarra, Ecuador?

Justificación

La investigación se enmarca en una carta de acuerdo y compromiso para realización de actividades de investigación y prácticas preprofesionales firmada el 05 de abril del 2024 por propietarios de la Hostería Cananvalle y decano de la Facultad de Ingenierías en Ciencias Agropecuarias y Ambientales.

La ejecución de esta investigación beneficiará directamente a los propietarios de los sistemas agroforestales, permitiéndole mejorar su productividad de café mediante la evaluación de propiedades edafológicas y condiciones micro climáticas. Este estudio busca tomar en cuenta la relación entre la cobertura arbórea, suelo y clima. Adicionalmente, la investigación tiene un impacto positivo en la comunidad local, puesto que varios empleos de mujeres y hombres se desarrollan dentro del predio.

En el ámbito edafológico se buscará evaluar la influencia de la cobertura arbórea en las propiedades físicas y químicas del suelo, mientras que en el micro climático se evaluó la incidencia de la temperatura, humedad ambiental y precipitación. Esto es relevante porque la mayoría de las investigaciones similares no se han realizado tomando en cuenta la relación directa entre las condiciones de cobertura arbórea, edafológicas y micro climáticas.

Este proyecto también será base para futuras investigaciones, debido a la ausencia de estudios desarrollados en Ecuador, contribuyendo a la mejora de la productividad de cafés dentro y fuera del país, partiendo principalmente de las propiedades edafológicas, condiciones climáticas y de cobertura arbórea.

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar las condiciones edafoclimáticas y de cobertura arbórea en tres sistemas agrosilvícolas que asocian variedades de café con especies forestales de Cananvalle Imbabura.

Objetivos específicos

1. Definir la estructura de tres sistemas agroforestales que asocian una especie forestal con diferentes variedades de café.
2. Determinar la auto sombra del cafeto en los tres sistemas agroforestales.
3. Relacionar los niveles de cobertura arbórea y auto sombra con los cambios observados en las propiedades edáficas y condiciones micro climáticas.

Preguntas de investigación.

¿Cuál es la estructura de los sistemas agroforestales?

¿Cómo influye la sombra y auto sombra en las condiciones edafoclimáticas de cada sistema agroforestal?

¿Cuál es el porcentaje de sombra total de los sistemas agroforestales?

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1Condiciones edafoclimáticas y cobertura arbórea

1.1.1. Definición e importancia del suelo

El suelo está en constante cambio, debido a la interacción de diferentes factores físicos, químicos, biológicos y antrópicos que se desarrollan dentro del mismo, los principales componentes son principalmente minerales, materia orgánica, agua y aire (Palma-López et al. 2023). La capa superficial de la tierra que sustenta la vida se denomina suelo, estudiar este recurso natural es fundamental para comprender tanto la conservación del medio ambiente como la productividad agrícola, ya que el suelo sirve como almacén de agua y nutrientes clave para las plantas (Castellanos, 2014).

El suelo es el medio en el que crecen las raíces y se producen reacciones físicas, químicas y biológicas, permitiendo la transformación y disponibilidad de nutrientes, controlando el ciclo del carbono y otros procesos, lo que ayuda a preservar la biodiversidad y frenar el cambio climático (FAO, 2019).

La Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía (2020) clasifica a los componentes en macronutrientes primarios como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), secundarios calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), y micronutrientes hierro (Fe), cobre, manganeso, boro, molibdeno, zinc y cloro, que son necesarios para el crecimiento de las plantas.

El Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura (2018) señala que la materia orgánica mejora la estructura del suelo, retiene la humedad y los nutrientes, además fomenta la actividad microbiana. El pH, que mide la acidez o alcalinidad del suelo e influye en la disponibilidad de nutrientes, para mejorar la fertilidad y salud del suelo, estos componentes deben estar equilibrados (Intagri, 2018). La quema de la vegetación podría mejorar el suelo, ya

que aporta ceniza la cual es rico en nitrógeno, una investigación realizada por Tariq et al. (2022), el estudio confirma que la quema de vegetación provocó un aumento en la concentración de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) en las capas profundas del suelo (50-100 cm)

1.1.2. Componentes del suelo

Los componentes principales del suelo se clasifican según su estado, sea sólido, líquido o gaseoso los cuales son la materia mineral, materia orgánica, agua y aire (Gonzales, 2007).

Los componentes sólidos representan al menos el 50% de la composición del suelo Van Konijnenburg (2006) señala que este porcentaje está conformado por partículas minerales (45%) que provienen de la desintegración de la roca madre subdividiéndose por su diferencia de tamaño en arena (1-0,05 mm), arcilla (<0,002), limo (0,05-0,002) y grava (2 mm). Las arcillas al ser las partículas más finas tienen la capacidad de cargarse de electricidad, por lo tanto, la facultad de retención e intercambio de elementos químicos fundamentales para las plantas (calcio, potasio y nitrógeno). Otro 5% está conformado por la materia orgánica (residuos vegetales, animales), componente significativo, ya que incrementa la capacidad de almacenar nutrientes, aumentando la porosidad y siendo fuente de alimento para microorganismos descomponedores (Van Konijnenburg 2006 y FAO, 2026).

Los componentes líquidos se encuentran presentes con un 20%-30%, pero no es necesariamente pura (como en los yacimientos) en cambio, está lleno de iones, sales y diferentes materiales orgánicos. Dependiendo de la porosidad del suelo, el agua en el suelo viaja por capilaridad (como una pajita) y transporta una variedad de materiales de un nivel a otro (Universidad Nacional de la Plata, 2021).

Van Konijnenburg (2006), indica que los componentes gaseosos ocupan un 20%-30%, el aire entra en los espacios a donde el agua deja espacios libres. El aire presenta varios gases

atmosféricos como el oxígeno (O2) y dióxido de carbono (CO2), pero en distintas proporciones. La presencia de dichos gases es fundamental para la respiración de las raíces y de todos los microorganismos.

1.1.3. Propiedades físicas y químicas del suelo.

Estas propiedades son características de un suelo sano, beneficiando a que un cultivo se desarrolle de manera adecuada (Vikraman et al., 2025).

La Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura (2026) lista a las propiedades físicas del suelo como la textura, estructura, porosidad, densidad y profundidad del suelo. Según Vikraman et al. (2025) indican que estos factores contribuyen principalmente la textura que hace referencia a la proporción de arena limo y arcilla que se encuentra presente en el suelo favoreciendo al proceso de almacenamiento de agua, nutrientes, penetración de raíces, aireación, drenaje y actividad microbiana. La FAO utiliza el triángulo de texturas como una herramienta para clasificar la estructura de la textura del suelo.

La estructura del suelo está conformada por diferentes partículas como arena, limo y arcilla, que forman diferentes agregados como laminar, columnar, prismática o bolcosa, lo cual afecta la aireación, el movimiento del agua y crecimiento radicular (UNLP, 2018).

Según la (FAO, 2026), la porosidad es el espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por 50% materiales sólidos y 50% de espacio poroso. Estos poros se clasifican en macroporos, mesoporos y microporos, encargados principalmente de la infiltración del agua, nutrientes, aire y gases. Entre ellos, los mesoporos se les conoce como poros de almacenamiento que retienen el agua que puede ser absorbida por los cultivos (Calderón et al., 2018).

Existen dos tipos de densidad, real y aparente. Conforme a lo mencionado por la FAO, (2026), la densidad se define técnicamente como la relación entre la masa y el volumen del sustrato. La densidad real se enfoca en el análisis de las partículas sólidas y varían según los elementos que lo conforman, encontrándose alrededor de 2,65 g/cm^3, en relación con la densidad aparente, un nivel alto revela un suelo compactado o un suelo arenoso (partículas gruesas).

Las propiedades químicas también son influenciadas por las físicas, ya que un suelo con adecuada textura y porosidad permite una mayor disponibilidad de nutrientes. Entre estas propiedades se incluyen a elementos como el pH (indicador de acidez o alcalinidad), la capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, la saturación de bases, macro y micronutrientes (FAO, 2026). Un estudio realizado en la India por Vikraman, et al., 2025 manifiestan que su estado afecta directamente a la solubilidad y disponibilidad de nutrientes para las plantas, un pH equilibrado favorece a las reacciones químicas y la actividad biológica que promueve la descomposición de la materia orgánica principalmente producto de la hojarasca.

De conformidad con lo indicado por Fertilab (2019), la conductividad eléctrica se emplea para evaluar la concentración de sales disueltas en el suelo, un nivel elevado ocasiona problemas de salinidad, lo cual incide en la absorción de agua, nutrientes afectando directamente al rendimiento del cultivo. La concentración de nutrientes determina el equilibrio químico necesario para evitar situaciones de toxicidad o deficiencias nutricionales para el cultivo (Fertilab, 2019)

1.1.4. La Temperatura, humedad y precipitación.

La temperatura del suelo tiene un impacto directo en la actividad química y biológica que tiene lugar dentro de este, pues las temperaturas excesivas pueden restringir estas

actividades y tener un impacto en el crecimiento de las raíces, mientras que temperaturas adecuadas promueven la desintegración de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes. Además, la actividad microbiana y la solubilidad de los nutrientes, dos componentes críticos de la fertilidad del suelo se ven afectadas por la temperatura (Proain, 2020).

Dado que el agua es el canal a través del cual los nutrientes se disuelven y llegan a las raíces de las plantas, la humedad del suelo es otra consideración importante. Si bien demasiada o muy poca agua puede provocar estrés hídrico, lo que puede dañar la salud del suelo y el crecimiento de las plantas, un contenido de humedad ideal promueve la actividad microbiana y la absorción de nutrientes (FAO, 2019).

Debido a que las lluvias intensas pueden provocar la pérdida de nutrientes como el calcio, el magnesio y el potasio, así como la acidificación del suelo, la precipitación afecta la humedad y el pH del suelo. Sin embargo, la cantidad de agua disponible restringe el crecimiento de la materia orgánica y la actividad biológica en regiones con poca precipitación. Por lo tanto, mantener un suelo rico y productivo requiere un equilibrio de temperatura, humedad y precipitación (Castellanos, 2014).

1.1.5 La cobertura arbórea sobre la materia orgánica y propiedades químicas del suelo.

La cantidad de materia orgánica en el suelo está directamente influenciada por la cubierta arbórea porque la caída de hojas, ramas y raíces muertas agrega nutrientes y carbono al suelo, mejorando la fertilidad. De acuerdo con Julca-Otiniano et al. (2006), la materia orgánica tiene un efecto positivo sobre las propiedades biológicas del suelo ya que favorece los procesos de mineralización, alimentando a diversidad de microorganismos descomponedores que habitan en el suelo. Debido a que la materia orgánica se agrega continuamente y los procesos de lixiviación disminuyen, el pH del suelo bajo la cubierta arbórea tiende a mantenerse dentro de los límites ideales (6.0 a 7.0) para la mayoría de las plantas (Villarreyna,

2016). Esto promueve la disponibilidad de macronutrientes como potasio, fósforo y nitrógeno, que son necesarios para el desarrollo de las plantas y la producción del ecosistema foresta (Intagri, 2018).

Los suelos con cobertura arbórea tienen cerca del 5% de nitrógeno (N) total, fuente principal de elementos esenciales para las plantas como fósforo(P), magnesio (Mg), calcio (Ca), azufre(S) y micronutrientes (Julca-Otiniano et al., 2006). La creación de tejidos, la fotosíntesis y el control del metabolismo de las plantas dependen de estos componentes. Por lo tanto, la fertilidad y el equilibrio del suelo se mantienen gracias a la cobertura arbórea (FUCREA, 2020).

1.1.6. La cobertura arbórea sobre las condiciones micro climáticas.

El follaje de los árboles disminuye la temperatura del aire y el suelo en comparación con los lugares que no están sombreados, por causa de la intervención de la copa de los árboles estos alterar factores como la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura del aire (Farfán 2013). Una investigación realizada en regiones urbanas de Brasil por Mascaró y Mascaró (2009) demostró que las temperaturas pueden descender entre 3 y 4 grados centígrados y la humedad relativa puede aumentar entre un 3 % y un 10% cuando hay árboles. Esto crea circunstancias más estables y agradables para la flora y fauna local (Duval, et al. 2020).

Además, la cubierta arbórea ralentiza la velocidad del viento, lo que reduce la evaporación del agua del suelo y ayuda a la conservación de la humedad en el área circundante. En los sistemas agroforestales y silvopastoriles, donde los árboles contribuyen a la creación de un microclima que protege el suelo y los cultivos o pastos, este impacto es especialmente significativo (Farfán, 2013). La evapotranspiración de los árboles sirve como un mecanismo

natural de termorregulación, preservando la humedad durante los períodos secos y enfriando el entorno durante el clima cálido (Martínez Toledo, et al., 2023; Amaya, et al. 2019).

Las especies de árboles, la densidad y el tipo de cubierta arbórea, y la estación del año pueden afectar el grado de influencia micro climática que hay. Las variables micro climáticas, por ejemplo, no cambiaron significativamente en ciertos ensayos, incluido el de Acacia caven, lo que sugiere que las diferentes cubiertas arbóreas tienen diferentes efectos o que estos efectos pueden ser transitorios y contingentes a características particulares del ecosistema. Por lo tanto, es crucial elegir las especies arbóreas apropiadas y manejar cuidadosamente la cobertura para maximizar los beneficios del microclima (Lucero et al, 2019).

1.2. Sistemas agroforestales

1.2.1. Importancia de sistemas agroforestales.

Los sistemas agroforestales se reconocen como una práctica efectiva y sostenible para el cultivo de café (Ruiz-García et al. 2020). En cuanto al concepto de agroforestería implica una relación integral entre la cobertura arbórea, el clima y el suelo (Farfán, 2014). La presencia de árboles en estos sistemas enriquece el suelo con materia orgánica, conserva la humedad durante las épocas de sequía y mejora las condiciones micro climáticas. García et al. (2020), afirma que los sistemas agroforestales de café son considerados una modalidad de producción estratégico enfocado en el desarrollo sustentable, dado que representa la subsistencia de pequeños productores.

Turbay et al. (2013) enfatizan como los caficultores han adoptado estrategias como el agroturismo, la integración de la mano de obra familiar, la asociatividad comunitaria y estrategias de comercialización en mercados, alternativas que mejoran los precios de venta y permiten a las familias productoras resistir momentos de crisis.

Zaro et al. (2020) señalan que el cultivo de café bajo sistemas agroforestales es más sostenible y puede mejorar el potencial de fijación de carbono, posicionando este enfoque como una alternativa relevante para mitigar el calentamiento global. En consonancia, Pico-Mendoza et al. (2020) destacan que los servicios ecosistémicos brindados por los SAF, como el mantenimiento de hábitats, la mejora de la calidad del agua, el control de la erosión y las reservas de carbono, dependen en gran medida del manejo proporcionado por los caficultores.

1.2.2. Componentes de sistemas agroforestales

Desde una perspectiva ecológica, los sistemas agroforestales aplican principios que integran el cultivo de *Coffea arabica L.* con especies arbóreas. Nasiro (2024) revisó múltiples estudios y concluyó que, a pesar de posibles reducciones puntuales en el rendimiento debido a la sombra, estos sistemas muestran un desempeño económico equivalente o incluso superior al monocultivo a largo plazo, gracias a los servicios ecosistémicos que ofrecen, como la conservación de la biodiversidad y la resiliencia frente al cambio climático.

En ese sentido, Ovalle-Rivera et al. (2015) advirtieron que el cambio climático reducido significativamente las áreas aptas para el cultivo de café a nivel global. No obstante, señalaron que la sombra, especialmente cuando alcanza hasta un 50 %, puede mitigar parcialmente esta pérdida. Para complementar, Cassamo et al. (2024) constataron que los sistemas agroforestales reducen en gran medida los impactos del calentamiento global a lo largo del siglo. Martin (2020) también subraya que la fertilidad del suelo está fuertemente influenciada por el tipo de manejo agroforestal aplicado.

En cuanto a la estructura ecológica del sistema, Villavicencio (2006) analizó un SAF y encontró que el Índice de Valor de Importancia (IVI) fue más alto para especies representativas de vegetación secundaria como *Bursera simaruba*, *Cordia alliodora*, *Cupania dentata* y

Bauhinia divaricata. Esta composición sugiere un cambio en los cafetales de tipo rusticano, donde especies maderables tradicionales están siendo reemplazadas por maderas blandas.

Sin embargo, la degradación de la cobertura arbórea es una amenaza latente. Mulatu et al. (2025) advierten que los cambios en la cubierta forestal pueden afectar negativamente el clima local, la disponibilidad de recursos y la productividad agrícola, lo cual deriva en pérdidas económicas y en un deterioro de las condiciones de vida de las comunidades rurales.

La resiliencia del escurrimiento superficial en una cuenca forestal es mayor cuando los bosques son mixtos (Zhang et al., 2017); por lo tanto, las estrategias silvícolas que preserven la diversidad de especies forestales son más conveniente para amortiguar la escasez de agua de años secos y los disturbios del cambio climático Gómez- Guerrero et al. (2021).

1.3 Café en sistemas agroforestales

1.3.1. Origen del café

El café es conocido como una de las bebidas más apetecidas por el paladar de las personas. Desde su descubrimiento en Etiopía- África por la tribu de los oromo, se ha convertido en un producto de alta demanda social y económica(Serrano et al., 2025). Diversos hallazgos sobre el origen del café se remontan a siglos atrás donde esta fascinante bebida era consumida en rituales religiosos, siendo indispensable en la mesa cuando festejaban nacimientos o casamientos (Monreal, 2010).

La evolución del café es trascendental, en el siglo XV aparecieron las primeras plantaciones en Yamen, se presume que los esclavos que eran vendidos y trasladados a diferentes países fueron quienes se encargaron de transportar las semillas haciendo que el café se multiplique de un continente a otro (Arusi, 2019). En 1860 se comprueba su introducción a Ecuador-Sudamérica, principalmente en la región costera, con el paso de los años la producción

incrementó y el país logró consolidarse como uno de los 14 principales exportadores de café (Chávez et al., 2024).

1.3.2. Desarrollo del café en sistemas agroforestales.

El cultivo de café se desarrolla en su mayoría bajo sistemas agroforestales (SAF), los cuales ofrecen múltiples beneficios agronómicos, ecológicos y productivos. En México, Garza et al. (2020) identificaron que el uso de *Erythrina poeppigiana* como árbol de sombra contribuye a mejorar el microclima y la fertilidad del suelo mediante la fijación biológica de nitrógeno. En este sentido. Asimismo, Virginio et al. (2018) observaron que un sombreado mixto favorece la sostenibilidad del rendimiento cafetalero y permite una recuperación más rápida de los recursos edáficos, especialmente cuando se asocia con especies como el guamo (*Inga spp*.).

En un contexto comparable, Chialva et al. (2023) evaluaron sistemas agroforestales mejorados (INAS) y tradicionales (ITAS) en cultivos de cacao en la Amazonía peruana. Los resultados mostraron que mantener un 50% de sombra, mediante la eliminación selectiva de árboles, mejora indicadores edáficos como el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los niveles de magnesio, en comparación con sistemas sin cobertura arbórea.

Por su parte, Somarriba et al. (2023) advierten que, a pesar de sus beneficios, la mayoría de las marquesinas de sombra en sistemas de café y cacao están diseñadas y gestionadas de forma subóptima, lo que limita la eficiencia del sistema. El café, por ser un cultivo perenne originario del sotobosque tropical africano y tolerante a la sombra, tiene un alto potencial para la conservación de la biodiversidad, la restauración de tierras degradadas y la mitigación del cambio climático mediante el almacenamiento de carbono (Pulleman et al., 2024).

1.4. Estudios previos sobre las condiciones edafoclimáticas y cobertura arbórea en sistemas agrosilvopastoriles

1.4.1. Influencia de la cobertura arbórea en los componentes del suelo con cultivos de cafetal

La fertilidad del suelo es un componente clave en los sistemas agroforestales cafeteros. El nitrógeno, principal nutriente para el café, se encuentra mayormente en la materia orgánica (M.O.). Según Arana-Meza (2003), al menos el 80% del nitrógeno total está en la M.O., mientras que solo entre el 2% y 5% está en forma inorgánica, que debe mineralizarse para estar disponible para la planta. Montagnini et al. (2015) añaden que este proceso depende de factores como el tipo de árbol de sombra, el clima y la sincronía entre la descomposición del mantillo y la absorción del cafeto.

Buyinza et al. (2024) concluyeron que la descomposición de hojarasca de árboles leguminosos mejora la fertilidad del suelo mediante el aporte de nitrógeno, reduciendo así la necesidad de fertilizantes sintéticos. En paralelo, Le et al. (2021), en cultivos de *coffea robusta* en Vietnam, observaron que los sistemas orgánicos con compost orgánico mantienen el nitrógeno en el suelo de forma similar a los sistemas convencionales con fertilización química, con el beneficio adicional de mejorar el pH del suelo y promover la biodiversidad del suelo.

En un estudio realizado por Lopez- Carmona, et al. (2023) mediante un análisis a las diferentes propiedades químicas y físicas del suelo, encontramos que la percepción campesina de una alta aptitud del suelo se encuentra en altitudes superiores a 1400 msnm, profundidad del suelo mayor a 1 m, condición ligeramente básica en su valor máximo de pH, 0.4 a 1 dS m −1 de conductividad eléctrica en su valor máximo, y valores bajos de Na. Fernández-Cortez et al. (2020) destacan la importancia de los análisis periódicos del suelo para diseñar planes de fertilización que se ajusten a las condiciones específicas del cultivo, corrigiendo deficiencias o

excesos derivados del manejo o del clima. Capa (2015) refuerza esta necesidad al criticar el manejo inadecuado de fertilizantes en los sistemas productivos del país.

La cobertura del suelo, influida por la acumulación de hojarasca de cafetos y árboles de sombra, también contribuye a la fertilidad al incrementar el contenido de M.O. (Villaroto-Sánchez et al., 2015). En Costa Rica, Baraër (2013) demostró que sistemas con mayor cobertura arbórea presentan tasas de mineralización del nitrógeno más rápidas (5.64 mg N/kg) en comparación con suelos a pleno sol (1.7 mg N/kg). Este proceso impacta directamente en la nutrición y producción del cafeto (DeMatta y Rodríguez, 2007; Avelino y Rivas, 2013).

Un estudio más reciente por Pinto-Soto et al. (2020) observaron que una cobertura de sombra entre el 23% y el 38% mejora significativamente el rendimiento del café (hasta un 48%), mientras que coberturas superiores al 50% pueden afectar negativamente la producción.

Cazco (2015) analizó la pérdida de suelo por el tipo de sombra, encontrando que las parcelas con musáceas perdieron hasta 43.39 gST/L, mientras que aquellas con pino o inga solo perdieron 0.30 y 0.55 gST/L, sugiriendo que no todas las sombras son igualmente eficientes para la conservación del suelo. Pico-Mendoza (2020), resalta las características edáficas ideales para el café con altitudes mayores a 1400 m s.n.m., suelos profundos (>1 m), pH ligeramente básico, conductividad eléctrica entre 0.4 y 1 dS/m y bajos niveles de sodio.

1.4.2. Influencia de la cobertura arbórea en las condiciones micro climáticas de tres sistemas agroforestales asociados con cultivos de café.

Le et al. (2021) mediante una investigación tuvo como resultado que a medida que el aumento de las temperaturas continúa reduciendo la idoneidad de muchas regiones cafeteras históricas, algunos agricultores están practicando el cultivo regenerativo y orgánico de café como medio de mitigación del cambio climático. Lin (2009) evaluó el crecimiento, caída y

peso de frutos de *Coffea arabica* bajo diferentes niveles de sombra, donde pudo evidenciar que tanto el peso de fruta fresca como el del grano seco se ven influenciados por la humedad del suelo retribuida al nivel de sombra.

Morales Peña et al. (2024) indicaron que la sombra (75,7%) mejora el balance hídrico del cafeto al reducir el estrés térmico, conservar la humedad del suelo y redujo la perdida de agua por evapotranspiración, promoviendo un desarrollo de las plantas más saludable. Salamanca (2017) también concluyó que el café bajo sombra proporciona un microclima lo que favorece la resistencia a plagas y enfermedades y prolonga la vida del cultivo. Muñoz-Villers et al. (2020) señalan que debido a la diferencia radicular de las especies forestales y del café no existe competencia por absorción de agua, puesto que mientras los arbustos de café dependen de la humedad de las capas superficiales los árboles extraen recursos de las capas intermedias y profundas del suelo.

Ehrenbergerová et al. (2021) demostraron que niveles intermedios de sombra no afectan negativamente la maduración del fruto ni el vigor de la planta, manteniendo un equilibrio adecuado entre crecimiento y microclima. Farfán (2014) complementa esta visión al señalar que los SAF permiten a los cafetales arborizados resistir fenómenos adversos como las heladas. Así mismo Villarreyna et al. (2016) resalta que los árboles de cobertura en cafetales regulan la carga fructífera del café, reducen las fluctuaciones extremas en la producción y mejoran el rendimiento general del cultivo al proveer servicios ecosistémicos esenciales.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1Tipo de investigación según los siguientes criterios

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que se evaluaron de manera clara y objetiva las condiciones edafoclimáticas y cobertura arbórea de los sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L) mediante la recolección de datos numéricos. Por su aspiración es aplicada ya que mediante la investigación realizada en diferentes fuentes bibliográficas se busca mejorar la calidad y productividad del café. El alcance es explicativo-correlacional ya que se expone como interactúan las condiciones edafoclimáticas y cobertura arbórea en los sistemas agroforestales. De acuerdo con el diseño de la investigación es no experimental dado que no se manipulan las variables debido a que son observadas en su estado natural. Sincrónico ya que se desarrolla en un único periodo de observación. Con relación al lugar es de campo debido a que todo el estudio se llevó a cabo en los tres sistemas agroforestales de Cananvalle. La investigación se desarrolló en tres sistemas agroforestales en Cananvalle, al norte del Ecuador en la provincia de Imbabura.

2.2.1. Política:

- **Parroquia:** El sagrario
- **Cantón:** Ibarra
- **Provincia:** Imbabura

2.2.2. Geografía del sitio investigación:

Las coordenadas de los tres sistemas agroforestales a estudiar son detalladas en la tabla1.

Tabla 1

Ubicación georreferenciada de los tres sistemas agroforestales de Ibarra

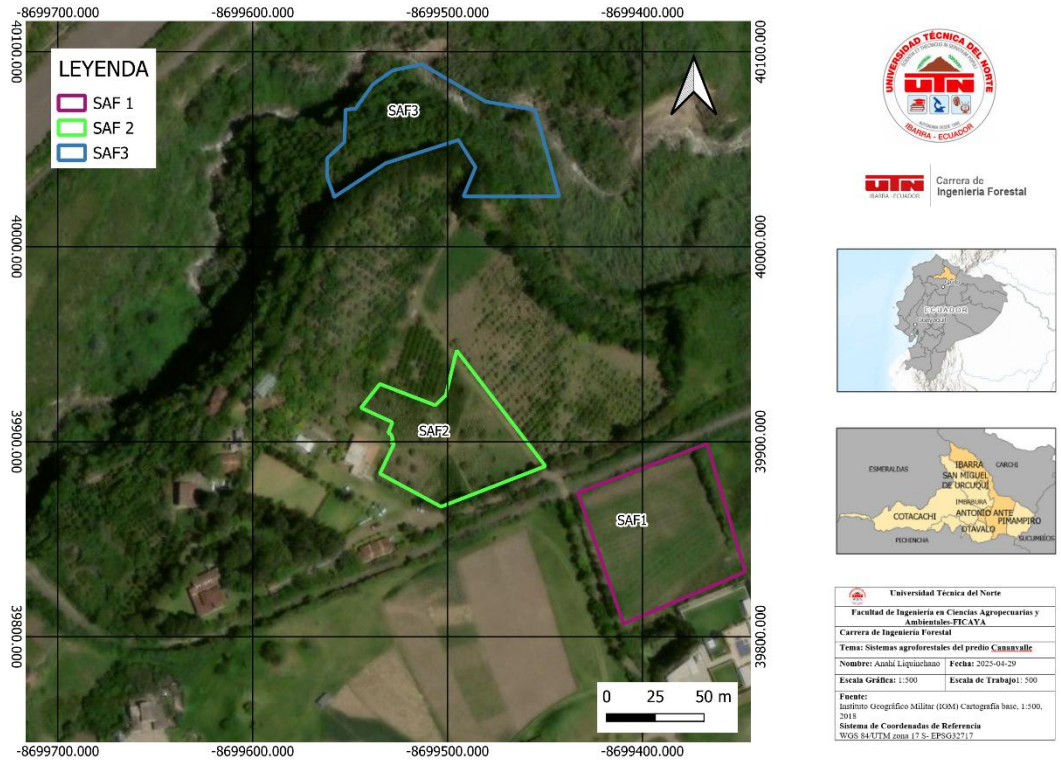
Sistema Agroforestal	Latitud	Longitud
SAF3	0°21’28,457’’N	78°8’59,566’’W
SAF2	0°21’30,140’’N	78°8’56,301’’W
SAF1	0°21’27,930’’N	78°8’52,828’’W

Nota. Las coordenadas geográficas de los sistemas agroforestales se recopilaron con un GPS de alta precisión. Fuente: Elaboración propia (2025).

Para mejorar la precisión en la ubicación geográfica de los sistemas agroforestales a evaluar se presenta en la figura1 el mapa correspondiente.

Figura 1

Mapa de sistemas agroforestales Cananvalle, Ibarra-Imbabura.



- Límites

El predio de Cananvalle se encuentra limitando al norte, sur y oeste el cañón de río Ambi y al sureste con predios de la Sra Reascos.

2.3. Caracterización edafoclimática del lugar

2.3.1. Suelo

Se determinó a partir del uso de shapefiles descargados del Geoportal del Gobierno Nacional del Ecuador (2013) los cuales fueron procesados en el software ArcMap 10.8.2 que el orden de suelo predominante en los tres sistemas es Molisol (Ayala y Torres, 2025).

2.3.2. Clima

El clima es templado seco, temperaturas entre 10-27 °C, a 2192 m de altitud (Hostería Cananvalle, sf)

2.4. Materiales, equipos y software

Los materiales de campo, equipos y software que se emplearon en el desarrollo de la investigación se especifican en la tabla 2.

Tabla 2

Materiales, equipos y software empleados en la investigación.

Materiales de campo	Equipos	Software
Cinta métrica	Hipsómetro	KoboToolbox
Herramientas para tomar muestras de suelo (pala, bolsas, cartón)	Densiómetro esférico	ODK Collect
	Dispositivo móvil	InfoStat
	Sensor termohigrómetro	Microsoft Excel

Nota. Herramientas, equipos y software fueron requeridas acorde a las necesidades del autor para realizar el estudio.

2.5. Métodos, técnicas e instrumentos.

2.5.1. Universo-Población

Universo: Tres sistemas agroforestales (SAF1: *Vachellia macracantha + coffea arabica*, SAF2: *Cordia alliodora + coffea arabica* y SAF3: *Persea americana + coffea arabica*) ubicados en el predio Cananvalle.

Población: SAF del predio Cananvalle.

2.5.2. Censo

Para las variables de sombra y auto-sombra se realizó un censo, por ende, no se seleccionó una muestra, en lugar de eso se medió la totalidad de individuos de los tres sistemas agroforestales (SAF1: *Vachellia macracantha + coffea arabica,* SAF2: *Cordia alliodora + coffea arabica* y SAF3: *Persea americana + coffea arabica*), mismos que representan las unidades de trabajo acorde a las variables de interés. Esto se debe al tamaño y las condiciones del predio Cananvalle, ya que permite el levantamiento adecuado de datos precisos y representativos de cada sistema agroforestal.

2.5.3. Explicar el trabajo desarrollado en gabinete y campo.

El trabajo de campo se desarrolló en Cananvalle, donde se obtuvo datos para georreferenciar el área, levantamiento de datos sobre las condiciones edafoclimáticas y cobertura arbórea. Mientras que el trabajo en gabinete consistió en la organización, tabulación, relleno y procesamiento de los diferentes datos recolectados en campo, con la finalidad de obtener un análisis estadístico que incluya correlaciones entre factores edafoclimáticos y cobertura arbórea.

2.6. Operacionalización de variables

2.6.1. Definir la estructura de tres sistemas agroforestales que asocian una especie forestal con diferentes variedades de café.

2.6.1.1. Caracterización

La caracterización de los tres sistemas agroforestal (SAF) con base en una adaptación a lo propuesto por Ospina (2006) dentro del criterio estructural se evaluaron los siguientes parámetros la metodología se adaptaron los siguientes parámetros:

- **Distribución horizontal en componentes vegetales**

Los componentes vegetales se deben clasificar como mezclada (sin orden geométrico o aleatoria) y zonal (fila, faja, cuadro, rectángulo, circulo, anillo, media luna, sinuoso, zigzagueante).

- **Densidad vegetal en el plano horizontal**

Para la determinación de la densidad vegetal en el plano horizontal registramos el número de individuos por especie y se los divide en dos estados principales: densa y esparcida.

Adicionalmente se incluyó el siguiente análisis:

- **Diversidad florística**

La densidad alfa (α-diversidad) se determinó mediante un censo florístico de los diferentes sistemas agroforestales, registrando la denominación de las especies presentes y el número de individuos. Para ello se utilizó índices de biodiversidad principales para cuantificar la diversidad alfa, mediante el uso del software Past 4.17 en el cual se obtuvieron resultados de Simpson 1-D, Shannon H y Margalef para la evaluación de los parámetros mencionados se usó la siguiente tabla 3.

Tabla 3

Rangos de interpretación de los índices de Simpson y Shannon

Índices	Valores	Interpretación
Shannon	0 – 1,35	Diversidad baja
	1,36 – 3,5	Diversidad media
	>3,5	Diversidad alta
Simpson	0-0,33	Diversidad baja
	0,34 – 0,70	Diversidad media
	>0,71	Diversidad alta

Aguirre (2013)

Tabla 4

Rangos de interpretación para el índice de Margalef

Índice	Valores	Interpretación
Margalef	< 2	Riqueza baja
	2,1 – 3,5	Riqueza media
	>3,5	Riqueza alta

Margalef (1951)

Para la determinación de lo antes expuesto se visitó los sistemas agroforestales donde se determinó el nombre de la especie mediante la identificación de los diferentes individuos forestales se realizó de forma visual con ayuda de claves taxonómicas y comparación con muestras del Herbario Forestal UTN.

El registro de datos se efectuó directamente con trabajo de campo mediante la observación directa con la estructura establecida en la matriz de la Tabla 5.

Tabla 5

Matriz de registro de datos para caracterizar los sistemas agroforestales

N° SAF	Especie	N° individuos

Sombra

La sombra se evaluó en referencia a la proyectada por los árboles forestales. Para ello se utilizó un densiómetro esférico que permitió estimar el porcentaje de sombra tomando en cuenta los cuatro puntos cardinales específicos.

Con base a la metodología propuesta por Muñoz(2013) que menciona colocar el densiómetro esférico sobre una base (superficie plana y fija) a una altura de 1,30 metros del suelo (altura variable) o la altura de los codos del observador, y a una distancia de 30 cm del observador, con la finalidad de que su cabeza no se refleje en el área de la cuadrícula del

densiómetro, se asume cuatro subcuadrados en cada cuadrado de la cuadrícula, y se asigna un punto por cada cuadrado que no refleje cobertura de dosel del bosque.

Se realizaron cuatro lecturas por posición, en dirección al Norte, Sur, Este y Oeste. Estos valores se promediaron para obtener un solo valor. El promedio obtenido se multiplicó por el factor 1,04 propio del instrumento mismo que representa la apertura del dosel del bosque (Muñoz, 2013). Datos registrados una sola ocasión, los datos se recolectaron en la Tabla 6.

Tabla 6

Matriz para obtener el cálculo de sombra de las especies forestales.

N° SAF	Lectura densiómetro N (%)		Lectura densiómetro S (%)		Lectura densiómetro E (%)		Lectura densiómetro O (%)		Promedio mediciones (PM)	Factor de cálculo (1,04)	Sombra total (PM*1,04)
	Norte	Sur	Norte	Sur	Norte	Sur	Norte	Sur			

2.6.2. Determinar la auto sombra del cafeto en los sistemas agroforestales

2.6.2.1. Auto sombra

Se determinó la auto sombra que desarrolla el café (*Coffea arabica* L.) dentro del sistema agroforestal se aplicó la metodología implementada por Valles (2021). Esta consiste en la medición única de las variables dasométricas como:

- **Diámetro de copa (m):** se midió el diámetro de copa de la planta utilizando una cinta graduada de precisión al centímetro tomando la dirección de norte a sur y de este a oeste, se registró los valores y posteriormente se procesaron mediante la ecuación uno propuesta por Prodan, Peters, Cox, & Real, (1997).

$$D.copa = \frac{D1 + D2}{2} \qquad \textbf{Ec. 1}$$

Donde:

D. copa= Diámetro de copa

D1= Distancia Norte-Sur

D2= Distancia Este-Oeste

- **Área de la copa(m):** Con los datos que se tomaron del diámetro de copa de cada planta de café se calculó el área de copa por árbol establecidos en el sistema con la ecuación dos propuestas por Prodan, Peters, Cox, & Real, (1997).

$$AC = \pi(\frac{Dc}{2})^2$$ **Ec. 2**

Donde:

Ac= Área de copa

Dc= Diámetro de copa

Π= 3.1416

- **Cobertura de copa total del cafeto(m):** Con el área de copa calculada de cada planta se suman para la obtención de la cobertura de copa total en la parcela haciendo uso de la ecuación tres expuesta por Somarriba, (2001).

$$ATc = \sum(AC1 + AC2 + AC3 + \cdots ACn \ldots)$$ **Ec. 3**

Donde:

ATc = Área total de copa por sistemas.

∑ = Sumatoria

AC = Área de copa

- **Porcentaje de auto sombra (%):** Para su determinación se dividió el área de cada uno de los sistemas agroforestales para el área total de copas empleando la siguiente ecuación propuesta por Somarriba, (2001).

$$Pa = \frac{AP}{ATc}$$ **Ec. 4**

Donde:

Pa = Porcentaje de auto sombra

AP = Área del predio

ATc = Área total de copa

2.6.2.2. Porcentaje de sombra existente en el sistema.

Se calculó para cada sistema agrosilvícola con el siguiente modelo matemático formulado por Somarriba, (2001).

$$\%\, Sombrio = \left(\frac{U.m.i.}{U.m.e.}\right) x\ 100$$ **Ec. 5**

Donde:

U.m.i.= Unidad de medición interna (% de área de copa o sombra del cafeto).

U.m.i.= Unidad de medición externa (% de sombra de especies forestales).

Los datos de las variables para la determinación de auto sombra del cafeto fueron colectados en la Tabla 7, mediate el dispositivo móvil con la aplicación Excel.

Tabla 7

Matriz para la recopilación de datos en plantas de café.

Especie	Sistema agroforestal	Tamaño de copa(m) N-S	Tamaño de copa(m) E-O

2.6.3. Relacionar los niveles de cobertura arbórea y auto-sombra con los cambios observados en las propiedades edáficas y condiciones micro climáticas.

Microclima

La medición de la temperatura (°C) y la humedad (%) se realizó con un termohigrómetro ubicado en el centro de cada SAF, a 1 m de altura sobre un soporte donde permaneció en cada ubicación durante 10 a 12 días antes de ser trasladado al siguiente sitio. La toma de datos se efectuó durante seis meses, para obtener más información y minimizar errores en los tres sistemas agroforestales. Este proceso siguió una estrategia de optimización de recursos y tiempo, considerando que se contó con un único equipo de trabajo. El registro se realizó cuando se movilizó el equipo al siguiente sistema agroforestal con ayuda del dispositivo móvil mediante bluetooth.

Precipitación (mm), se tomaron diariamente los datos registrados por el INHAMI desde la estación M1240 perteneciente a la ciudad de Ibarra. Datos que fueron tomados hasta culminar con la medición de las variables de temperatura y humedad ambiental en los tres sistemas agroforestales.

Suelo

Las variables evaluadas dentro de los parámetros edafológicos comprenden las propiedades químicas y físicas entre ellas se encuentra materia orgánica (%), pH, nitrógeno (N%), fósforo (P%), potasio (K%), calcio (Ca%), magnesio (Mg%), manganeso (Mn), boro(B), zinc (Zn), hierro (Fe), cobre (Cu), densidad real, densidad aparente, porosidad y textura. Según Agrocalidad (2008), el procedimiento se realizó mediante un muestreo espacial, en el cual se tomaron de 20 a 25 submuestras de suelo en un recorrido en zig-zag a 20 cm de profundidad, para luego homogenizarlas y obtener una muestra compuesta con un peso de 1 kg.

Para este estudio, se adaptó la metodología anteriormente citada, obteniendo 3 submuestras de suelo en cada sistema agroforestal (SAF1: *Vachellia macracantha + coffea arabica*, SAF2: *Cordia alliodora + coffea arabica* & SAF3: *Persea americana + coffea arabica*) en un recorrido en zigzag a 20 cm de profundidad con la pala recta. Estas se homogenizaron y enviaron identificadas y selladas mediante el protocolo establecido por los laboratorios de Agrocalidad e INIAP de la ciudad de Ibarra.

Adicionalmente, se realizó un análisis de suelo y evaluación micro climática en un predio aislado al sistema agroforestal con la finalidad de comparar las características en ambos sistemas. La evaluación se realizó una sola vez mediante análisis de laboratorio, y los resultados fueron procesados con estadística correlacional usando el software InfoStat.

2.7. Procedimiento y análisis de datos

Esta investigación tiene un enfoque correlacional por lo tanto es no experimental, los resultados permitieron determinar la influencia de las variables de porcentaje de sombra total del sitio en las condiciones edafológicas y microclimáticas.

El procesamiento inició realizando pruebas de normalidad y homogeneidad de las varianzas con dos pruebas de Shapiro-Wilk (modificado para ello se consideró el p-valor, al no cumplir con los supuestos antes mencionados, se ejecutó un análisis de Correlación de Pearson para determinó la relación entre la sombra y los factores edafoclimáticos específicamente, se relacionaron las variables:

Sombra vs. factores edáficos.

Sombra vs. condiciones climáticas (temperatura, humedad relativa y precipitación).

Este procesamiento se llevó a cabo mediante el uso del software estadístico Rstudio.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de sistemas agroforestales de forma estructural.

3.1.1. Distribución y densidad horizontal en componentes vegetales.

Los hallazgos del estudio muestran una heterogeneidad considerable en la composición de los tres sistemas agroforestales (SAF1: *Vachellia macracantha + coffea arabica*, SAF2: *Cordia alliodora + coffea arabica* y SAF3: *Persea americana + coffea arabica),* se contabilizó el número de individuos entre árboles y arbustos (café) donde para el SAF1 se registraron 134 árboles y 557 arbustos, mientras que el SAF 2 se encontraron 57 árboles y 329 arbustos, finalmente en el SAF 3 se observó la existencia de 124 árboles y 719 arbustos, tal como se puede apreciar en la tabla 8.

Tabla 8

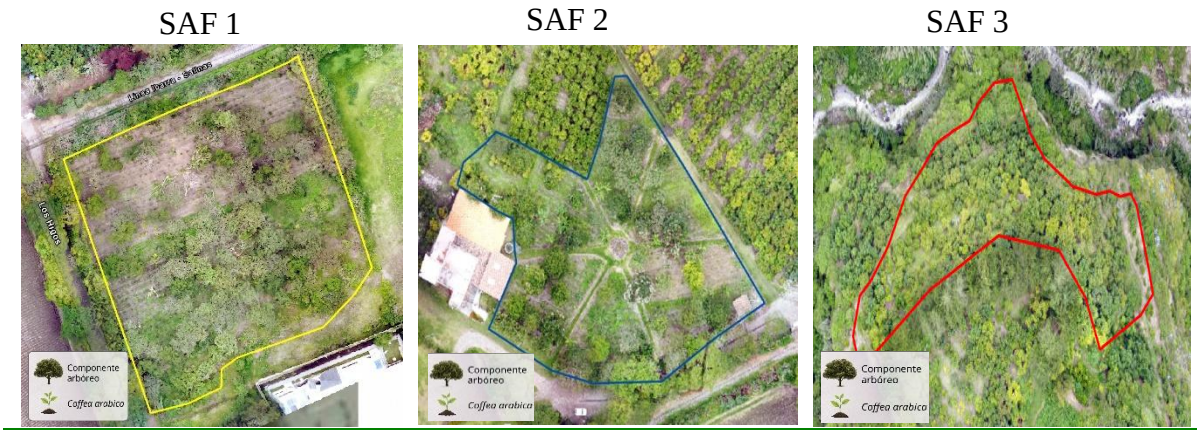
Composición florística de sistemas agroforestales en el predio Cananvalle.

SAF 1		SAF 2		SAF 3	
Especie	N° ind.	Especie	N° ind.	Especie	N° ind.
Vachellia macracantha	30	*Cordia alliodora*	18	*Persea americana*	117
Tecoma stans	17	*Juglans neotropica*	3	*Jacaranda mimosifolia*	7
Cupresus macrocarpa	4	*Arecaceae*	1	*Coffea arabica*	719
Ricinus communis	46	*Ricinus communis*	6		
Juglans neotropica	35	*Musa*	26		
Spathodea campanulata	2	*Spathodea campanulata*	3		
Coffea arabica	557	*Coffea arabica*	329		

Con base en la evaluación del número de individuos, apreciación visual y acogiéndonos a las categorías de la metodología de Ospina (2006) la distribución del SAF 1 y SAF 3 tiene una clasificación denominada mezclada, a diferencia del SAF 2 cuya distribución se determinó como zonal, misma que se puede apreciar en la figura 2.

Figura 2

Distribución horizontal de especies arbóreas y cafetales dentro de tres sistemas agroforestales evaluados.



Nota. La organización de los componentes de cada sistema agroforestal está clasificada en SAF1 *Vachellia macracantha + Coffea arabica*, SAF2 *Cordia aliodoria + Coffea arabica* y SAF 3 *Persea americana + Coffea arabica* siendo los más predominantes.

Los resultados son similares a un estudio realizado por Celi-Delgado y Aguirre-Mendoza (2022) quienes reportaron una dinámica similar con parcelas de 20m x20m en sistemas agroforestales con variedades de café y cacao, donde obtuvieron la existencia de 152 individuos para el estrato arbóreo entre ellas *Cordia alliodora* siendo la especie con mayor número de individuos de árboles y 427 individuos arbustivos entre ellos el mayor número se encuentran las variedades de café, esta diferenciación numérica se debe a las distintas dimensiones de los predios evaluados.

La implementación de sistemas agroforestales para cultivar café beneficia directamente a la producción, Farfán (2014) menciona que un cultivo con especies forestales y agrícolas está relativamente marcado por ofrecer productos de calidad, evitando el uso de fertilizantes externos, lo cual beneficia a minimizar costos a dueños de los predios.

3.1.2. Diversidad florística

Los análisis de diversidad mostraron diferencias entre los sistemas agroforestales evaluados. El valor más alto del índice de Shannon (H') 0,78, fue el del SAF 1, por encima del SAF 2 (0,63) y el SAF 3 (0,45). De acuerdo con los rangos de Aguirre (2013), todos los sistemas pertenecen a la clase de baja diversidad (valores que oscilan entre 0 y 1,35). Con relación al Índice de Simpson, se observó que la diversidad del SAF 1 (0,34) fue decreciendo hasta el SAF 3 (0,25), lo cual indica que en el tercer sistema la dominancia de especies es más alta. Por último, el Índice de Margalef reveló una baja riqueza en todas las ubicaciones, sin embargo, el SAF 2 se destacó ligeramente con un valor de 1,18, en contraste con el 0,92 del SAF 1 y el 0,30 del SAF 3, como se observa en la tabla 9.

Tabla 9

Índice de diversidad de Shannon en tres sistemas agroforestales.

Índice	SAF 1	SAF 2	SAF3
Shannon_H	0,78	0,63	0,45
Simpson_1-D	0,34	0,27	0,25
Margalef	0,92	1,18	0,30

Degefu y Efa (2025) reportaron valores significativamente superiores en sistemas con alta complejidad ecológica, los autores encontraron un Índice de Shannon (H') de 3,09, en comparación con los obtenidos en la presente investigación el Índice de Shannon H varía entre 0,45 y 0,78 valores muy bajos lo que indica una baja estabilidad del ecosistema.

Del mismo modo, dichos autores reportaron un Índice de Diversidad de Simpson de 0,875, mientras, el resultado de los sistemas evaluados en este estudio evidencia un nivel de diversidad baja. Finalmente, la diferencia aún es más notable en la riqueza de especies ya que Degefu y Efa (2025) obtuvieron un Índice de Margalef de 7,86, lo que favorece la

multifuncionalidad y diversidad de rasgos funcionales, los valores registrados en el presente estudio son menores. Los niveles de diversidad bajos se presentan a consecuencia del intenso manejo del componente arbóreo, priorizando la eliminación selectiva de especies con el objetivo de optimizar espacio y generar la entrada de luz al cultivo de *Coffea arabica*.

3.1.2. Sombra

El porcentaje de sombra presenta una variación mínima entre los tres sistemas agroforestales, destacando el SAF3 (*Persea americana* + *Coffea arabica*) con el valor más alto (50.18%), seguido por el SAF2 (49.92%) y el SAF1 (49.40%) lo que se aprecia en la tabla 10.

Tabla 10

Porcentaje de sombra promedio en tres sistemas agroforestales (SAF) del componente arbóreo.

Sistema Agroforestal	Porcentaje de sombra
SAF 1	49,40%
SAF 2	49,92%
SAF 3	50,18%

Los porcentajes de sombra obtenidos presentan cierta similitud con los reportados por Andrade y Segura (2016) en Colombia, quienes evaluaron la cobertura de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales mediante fotografía hemisférica y registraron un valor promedio de 47,7 %. Por su parte, Valles (2021) y Añazco Romero et al. (2024), en estudios desarrollados en Intag, provincia de Imbabura, determinaron un porcentaje de sombra de 36,84 % en sistemas agroforestales con *Alnus nepalensis*. Este valor es inferior al observado en la presente investigación, donde los tres sistemas agroforestales registraron porcentajes de sombra comprendidos entre el 49 % y el 50 %. Estas diferencias pueden atribuirse, principalmente, a las características morfológicas de la copa de las especies arbóreas utilizadas, las cuales influyen directamente en la cantidad de cobertura proyectada sobre el cultivo (Farfán, 2013).

En este sentido Somarriba et al. (2023) en un estudio realizado en Costa Rica menciona que el nivel óptimo de sombra está entre el 50-60% que ha sido reportado como ideal para maximizar la producción y calidad del café bajo condiciones de alto estrés solar y térmico. Por lo tanto, con los resultados registrados en la evaluación de tres sistemas agroforestales resulta ser adecuado para el cultivo de *Coffea arabica*.

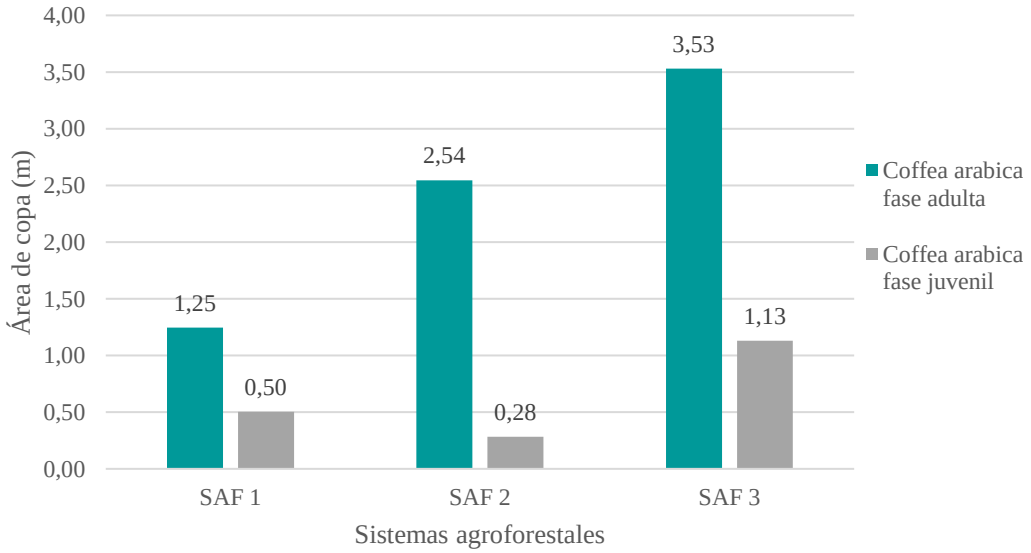
3.2. Determinación de la auto sombra del cafeto en los sistemas agroforestales

3.2.1. Análisis de área promedio de copa

El sistema agroforestal tres (SAF 3) promueve el mayor desarrollo del área de copa en los cafetos (figura 3), registrando valores más altos tanto para las plantas adultas con 3,53m, como para las plantas jóvenes con 1,13 m. En cambio, el SAF 1 presenta los valores más bajos para el estrato joven (0,50 m) y más altos para el estrato adulto, mientras que el SAF 2 muestra un buen desarrollo en plantas adultas (2,54 m) pero el menor desarrollo en plantas jóvenes (0,28 m).

Figura 3

Comparación de diámetros promedio de copa de Coffea arabica en tres sistemas agroforestales.



Nota. Los individuos del cafeto se clasificaron en una fase adulta >1,3m de altura y otra juvenil >1,3 m de altura.

El área de copa de las especies forestales es un indicador estructural clave para el manejo del microclima en los SAF cafetaleros. En comparación con los resultados datos de fase adulta de *Coffea arabica* analizados en el presente estudio, Valles (2021) registró valores menores en la zona de Cuellaje, Intag (1,10 a 1,53 m²), al evaluar variedades como Catucay amarillo, Caturra, Colombia, Etiopía, Típica mejorada y Costa Rica. Frente a valores que oscilan entre 1,25 – 3,53 diferencia asociada principalmente al nivel altitudinal y a las condiciones biofísicas de cada sitio, dado que el estudio de referencia se situó a 1848 msnm., frente a los 2187 m s. n. m. de Cananvalle. Da Matta et al. (2007), explican que, bajo condiciones de sombra más densa y estable, las plantas de café tienden a maximizar su intercepción de luz expandiendo su área foliar y, consecuentemente, su diámetro de copa.

3.2.2 Porcentaje de auto sombra de café

En la Tabla 11 se detalla el porcentaje de auto sombra registrado en las plantas de *Coffea arabica* dentro de los tres sistemas evaluados. Se observa una variación notable influenciada por la especie forestal asociada. El SAF 3 presentó el valor más alto con un 65,4% de auto sombra, seguido por el SAF 2 con un 60,3%. Por el contrario, el SAF 1 registró el porcentaje más bajo, con apenas un 35,82% de auto sombra en los cafetos.

Tabla 11

Porcentaje de auto sombra del café en tres sistemas agroforestales.

Sistema agroforestal	Porcentaje de auto sombra *Coffea arabica*
SAF 1	35,82%
SAF2	55,3%
SAF3	65,4%

Los resultados obtenidos muestran una variabilidad significativa que se atribuye a la edad de los cultivos. En el SAF1 se registraron cafetos desde los 8 meses hasta los 3 años entre las variedades de Gueisha, Bourbon, Etiopie, Typica y Sidra; en el SAF2, desde los 8 meses hasta los 5 años con variedades entre Mokka, Bourbon, Tabi, Java, Catucaí, Sidra, Typica; y en el SAF3, individuos de 15 años con Caturra rojo y amarillo. Esto evidencia que el tiempo de madurez, el desarrollo y la arquitectura de las diferentes variedades de café influyen directamente en el porcentaje de auto sombra.

Valles (2021), menciona que existe una media del 56,03% de auto sombra asemejándose considerablemente a los resultados obtenidos en el SAF2 en esta investigación. No obstante, tras analizar los límites técnicos Pérez y Suárez (2011) quienes sostienen que el porcentaje de auto sombra adecuado debe ser inferior al 64%, debido a que un exceso afectaría el rendimiento del cultivo, en función de este criterio, el SAF1 tiene un déficit de auto sombra puesto que son plantas jóvenes, SAF2 se encuentra en el rango limite y el SAF3 sobrepasa los niveles. Sin embargo, la sombra densa puede favorecer más la actividad reguladora de Lecanicillium lecanii sobre roya (Pico, 2014).

3.2.3 Porcentaje de sombra total del sistema.

La sumatoria del porcentaje de sombra proyectada por las especies forestales y auto sombra del cultivo de café determinó el porcentaje total de sombra que existe dentro de cada uno de los sistemas agroforestales estudiados. Resultando el mayor porcentaje de sombra el SAF 3 (82,72%), superando al SAF 2 (77,61%) y al SAF 1 (67,52%). Este incremento progresivo guarda relación directa con la distribución espacial del componente leñoso, el cual varía de una categoría esparcida en los dos primeros sistemas a una cobertura densa en el SAF 3.

Tabla 12

Comparación de niveles de sombra en tres sistemas agroforestales del predio Cananvalle.

Sistema agroforestal	Porcentaje de sombra total
SAF 1	67,52%
SAF2	77,61%
SAF3	82,76%

El cultivo de *Coffea arabica* una especie originaria del sotobosque con altos niveles de sombra, se beneficios al asociarse con árboles, pues su sombra contribuye directamente a mitigar los efectos del cambio climático lo que conlleva la mejora de su productividad y a los trabajadores, ya que promueve un mejor ambiente laboral durante los días de intensa radiación, facilitando las labores de cuidado, mantenimiento y cultivo de café.

Estos hallazgos coinciden con la investigación de Lin, 2009, quien realizó un análisis comparativo de sombra media (35%-65%) y alta (65%-80%) en sistemas agroforestales, la autora argumenta que a medida que las condiciones para el cultivo del café son más variables, la sombra se convierte en un factor más importante para proteger la producción del cafeto. Ayala y Torres (2025) corroboran el incremento de la productividad del café con al menos el 75% de sombra dentro de sistemas agroforestales.

La necesidad de un porcentaje de sombra densa radica en que Ecuador se encuentra en el centro del planeta, atravesado por la línea ecuatorial (paralelo 0), recibe altos niveles de radiación solar, especialmente cerca del nevado Cayambe. Esta radiación solar, incrementa las épocas de sequía atribuidas al cambio climático, por lo tanto, el porcentaje de sombra que se considera elevado en otras latitudes se establece como un nivel óptimo garantizando la sanidad en el cultivo de *Coffea arabica*.

Al comparar con un estudio realizado en Costa Rica en el cual Somarriba (2023) indica que los nivele de sombra óptimos para el cultivo de café se encuentra entre 50-60%. En

contraste, para Ecuador, el resultado revela niveles de sombra entre 60-80%. Esta diferenciación se explica por los niveles de radiación significativamente más altos en Imbabura, Ecuador (1662,2 kWh/m^2 anual), en contraste con Costa Rica (874,5 kWh/m^2 anual), según los informes de Atlas Solar Global interfaz que muestra un mapa interactivo para la evaluación del potencial solar y recursos de radiación solar. Esta variación en la radiación solar hace necesario el establecimiento de diferentes porcentajes de sombra para el cultivo de café.

3.3. Relación de niveles de cobertura arbórea y auto sombra con los cambios observados en las propiedades edáficas y condiciones micro climáticas.

Se determinaron las propiedades químicas y físicas del suelo para identificar niveles críticos de disponibilidad que comprometan el desarrollo fisiológico del cafeto. En el anexo 1 y 2 se presentan los análisis correspondientes a los tres sistemas agroforestales.

3.3.1. El pH

Los sistemas agroforestales estudiados presentan niveles de pH similares que van de 8,2 a 8,5 lo que se evidencia en la tabla 13, categorizado dentro de la escala como alcalino, este elevado valor del potencial de hidrógeno provoca que algunos micronutrientes no puedan ser absorbidos por las plantas, haciendo que estas puedan tener problemas en su desarrollo productivo y fertilidad del suelo.

Tabla 13

Niveles de potencial de hidrógeno en tres sistemas agroforestales.

Sistema agroforestal	pH
SAF1	8,22
SAF2	8,49
SAF3	8,34

Nota. Para más detalle véase el anexo 1.

Los niveles altos de pH radican en los elevados valores de Ca, probablemente influenciados por la geología suelos volcánicos de la provincia de Imbabura, generan un bloqueo de micronutrientes como hierro, manganeso y zinc, tal como lo describen Vitti et al, (1993) en sus estudios sobre nutrición mineral en café, donde un pH superior a 7.0 insolubiliza estos elementos, obligando a la planta a invertir energía adicional en su absorción.

En el contexto del cultivo de café (*Coffea arabica* L.), estudios como el de Sadeghian (2008) en Colombia destacan que el rango óptimo de pH se encuentra entre 5.0 y 5.5, con tolerancia hasta 6.0, ya que en condiciones más ácidas o alcalinas se reduce la absorción de nutrientes esenciales.

Esta condición alcalina presenta síntomas como clorosis, sin embargo, son plantas productoras, lo cual podría estar asociado con la presencia de los árboles que proporcionan sombra al cultivo ayudando a mitigar el estrés que puede generar el suelo alcalino.

3.3.2. Materia orgánica

El SAF 3 presenta un 5.02% de MO (clasificado como alto), debido al alto aporte de hojarasca del aguacate y el café, que crea una capa orgánica protectora y favorece la actividad microbiana. En comparación con el SAF 1 (*Vachellia macracantha*) muestra un 4.12% (medio), a pesar de ser una leguminosa fijadora de nitrógeno, lo que significa una menor acumulación de hojarasca comparado con SAF 3. SAF 2 (*Cordia alliodora*) registra solo un 1.82% (bajo), la deficiencia de materia orgánica en los sistemas de cultivo de café con *Cordia alliodora* se debe principalmente a la rápida descomposición de sus hojas, que no contribuye a la acumulación prolongada de materia orgánica en el suelo.

En suelos volcánicos andinos, ideales para el café, niveles superiores al 5% son recomendados para mantener la fertilidad, como se indica en estudios sobre stocks de carbono

orgánico en paisajes andinos colombianos, donde la MO alta en sistemas agroforestales contribuye a la resiliencia contra la erosión (Carvajal et al, 2009).

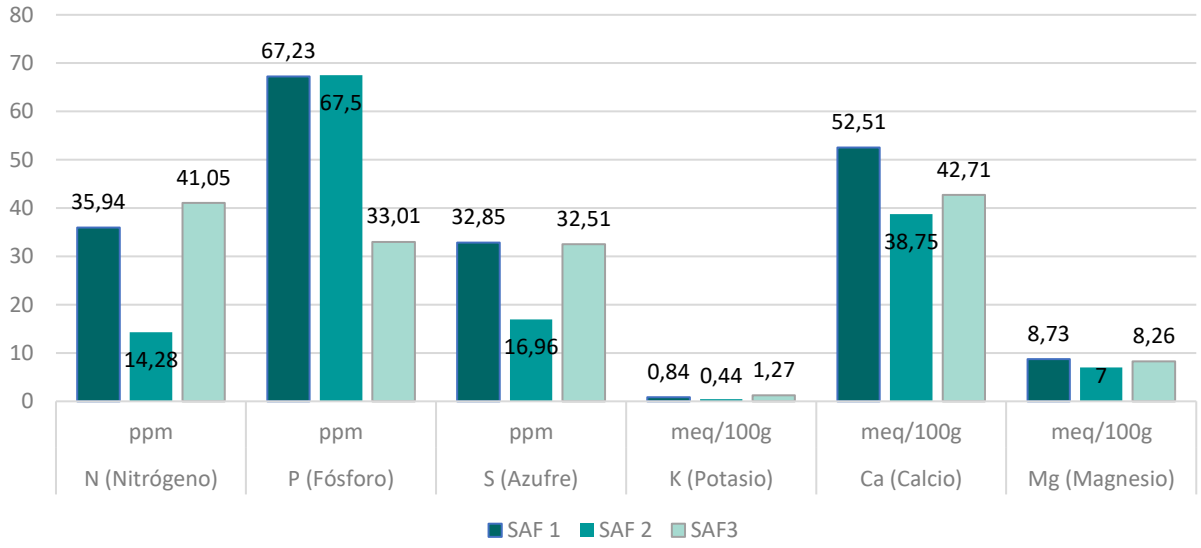
3.3.3. Propiedades químicas

3.3.3.1 Macronutrientes

Los macronutrientes disponibles para el cultivo de *Coffea arabica* en tres sistemas agroforestales del predio Cananvalle provincia de Imbabura se muestran en la figura 4.

Figura 4

Micronutrientes disponibles para el cultivo de café (Coffea arabica).



El rango óptimo de Nitrógeno para el cultivo de café es (24-30 ppm), en los sistemas agroforestales uno y tres(35,94 ppm y 41,05 ppm) estos valores indican que el ciclo de nutrientes dentro del sistema agroforestal es eficiente, donde la presencia de especies forestales como (*Vachellia macracantha y Persea americana)* generan un aporte constante de biomasa mantienen niveles saludables sin necesidad de fertilización externa, mientras que el SAF2 (*Cordia alliodora + Coffea arabica*) tiene un nivel más bajo de nitrógeno (14,28) lo cual es concordante con el bajo contenido de materia orgánica. Guazha (2025), menciona que los

macronutrientes como el nitrógeno (N) son clave en la fertilidad del suelo en sistemas agroforestales con café.

Para el fósforo (P) el rango óptimo se encuentra entre (10-30 ppm) mientras los resultados arrojan valores altos en SAF 1 y SAF 2 (67,23 ppm y 67,5 ppm), pero baja en el SAF 3(33,1ppm), el P se fija con calcio formando compuestos insolubles (que no pueden ser absorbidos por la planta), indicando una reserva de nutrientes en el suelo. El azufre (S) cuenta con rangos óptimos para el cultivo de café(10-20ppm) en este sentido el SAF 1 y SAF 3 tiene niveles excedentes (32,85 ppm y 32,51ppm), solo el SAF 2 presenta niveles óptimos disponibles para ser absorbidos por la planta de café (*Coffea arabica*) bajo niveles de sombra del 55%, según lo mencionado en el Manual cafetero colombiano de Sadeghian (2013).

El Calcio (Ca) se encuentra en niveles excesivos para los tres sistemas agroforestales (52,51 meq/100g, 38,75 meq/100g y 42,71 meq/100g) el cultivo de café, muy por encima del óptimo (>3cmol/kg), lo cual es el factor determinante en la alcalinidad del suelo (pH 8,22), Lin et al. (2017) menciona que cuando el calcio aumenta consecuentemente el pH aumenta también.

El Magnesio (Mg) registra niveles excesivos en los tres sistemas evaluados con valores de 8,73 meq/100g, 7 meq/100g y 8,26 meq/100g frente a los niveles ideales para el cultivo de café (1-3meq/100kg), debido al exceso de Mg se bloquea el paso del Potasio hacia dentro de la planta, aun cuando este arrojó un valor de 0,84 meq/100g calificado por el laboratorio como alto, sin embargo, para un suelo con productividad de café se encuentra dentro del rango favorable (>4), la planta no puede absorberlo ocasionando problemas graves para la producción y desarrollo. Un estudio realizado por Ertiftik & Zengin (2017) corrobora que un exceso de Ca y Mg puede afectar negativamente al rendimiento y la calidad de las plantas. Por ejemplo, en

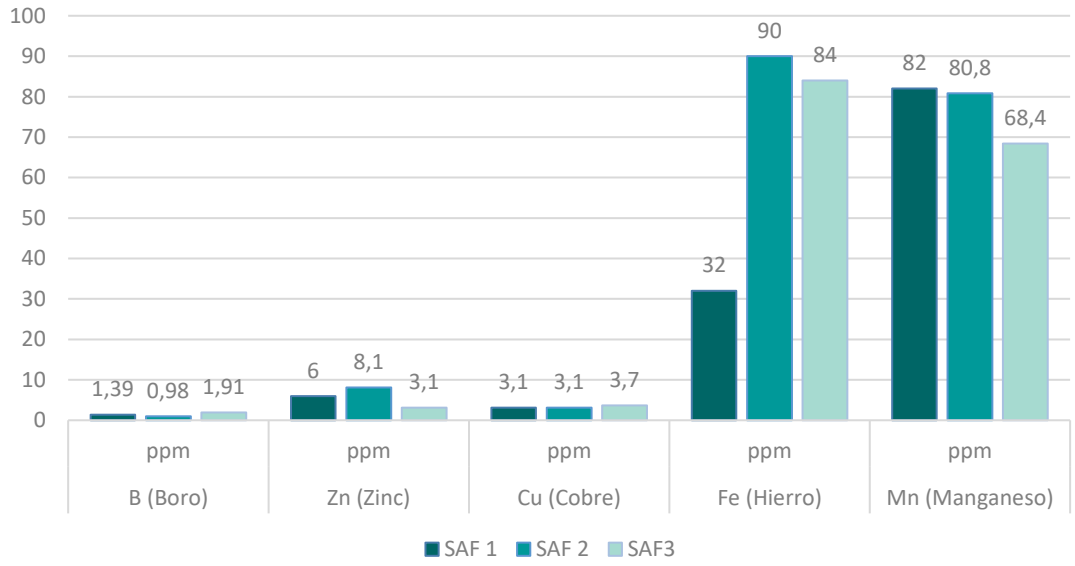
el maíz y la caña de azúcar, se ha demostrado que niveles altos de Ca y Mg reducen la absorción de K, lo que conduce a menores rendimientos y desequilibrios nutricionales (Gaj et al., 2018).

3.3.3.2. Micronutrientes

Los micronutrientes disponibles para el cultivo de *Coffea arabica* en tres sistemas agroforestales del predio Cananvalle provincia de Imbabura se muestran en la figura 4.

Figura 5

Micronutrientes disponibles para el cultivo de Coffea arabica.



En suelos con pH superior a 7.0, como el 8.22 arrojados en este análisis, la disponibilidad de micronutrientes esenciales para el café disminuye drásticamente, limitando la absorción por las raíces pese a concentraciones adecuadas para el cultivo (Dewanwan et al., 2023).

Los niveles de Boro (B) para el cultivo de café se encuentra entre 0,5 -1 ppm, en el SAF 1(1,39 ppm) y SAF 3 (1,91 ppm) indicando niveles excesivos y SAF 2(0,98 ppm) considerado adecuado, sin embargo, estos se encuentran estancados debido al elevado nivel de pH de los

tres sistemas estudiados. El rango óptimo de Zinc para cultivos de café se encentra en valores de (2-10 ppm), en este sentido los resultados para el SAF1(6 ppm), SAF2 (8,1 ppm) y SAF3 (3,1 ppm) se encuentran dentro de los niveles adecuados para el desarrollo de la planta. A pesar de ello, este microelemento es bloqueado debido al pH, provocando síntomas como clorosis férrica (hojas amarillas con venas verdes), síntomas documentados por Olszewska et al (2008).

El cobre (Cu) se encuentra en niveles deficientes en los sistemas agroforestales (SAF1 y 2: 3,1 ppm SAF 3: 3,7), ya que se encuentran por debajo del rango óptimo (5-15 ppm). Según Castellanos, (2014) el cobre se ve aún más reducido en suelos con pH alcalino, generando deficiencias significativas en la tasa de fotosíntesis y la concentración de clorofila en las hojas, lo que conduce a una reducción del crecimiento y la productividad de las plantas.

Sadeghian (2013), indica que un nivel óptimo de hierro para los cultivos debe mantenerse entre 75ppm y 150ppm, se observa que para el SAF1 este elemento se encuentra en menor proporción con 34 ppm mientras que el SAF2 y SAF3 (90 ppm y 84ppm), se encuentran en un rango equilibrados para ser absorbidos por el cultivo. Esta variación de contenidos de hierro concuerda con un estudio realizado en cultivos de *Coffea arabica* L donde Ferras et al. (2025) documentaron que las concentraciones suelen mantenerse en niveles ideales, existen excepciones donde se registran niveles inferiores como los reportados en el año 2020 con valores que oscilan entre 18,17 mg/kg y 23,03mg/kg.

El manganeso se encuentra frecuentemente presente en suelos alcalinos en escasas proporciones, mientras que la concentración ideal para el crecimiento de las plantas de café oscila entre 70 y 150 ppm. El SAF 3 (68.8 ppm) difiere significativamente de SAF1 (82 ppm) y SAF2 (80.8 ppm) en los análisis de los sistemas agroforestales. A partir de estos datos se puede apreciar, que, a pesar del pH alcalino, solo en el SAF3 hay deficiencia de manganeso esto puede estar relacionado con la constante fertilización que se realiza y a la descomposición

de materia orgánica en los otros sistemas. Los resultados coinciden con los hallazgos realizados por Ferras et al. (2025) ya que se reporta que el manganeso es el elemento más abundante a diferencia de Hierro y Cobre. Así mismo Busato et al. (2023), sostiene que la dinámica nutricional del cultivo se encuentra relacionada a una compleja interacción entre el manejo del suelo y condiciones climáticas.

3.3.4 Propiedades físicas

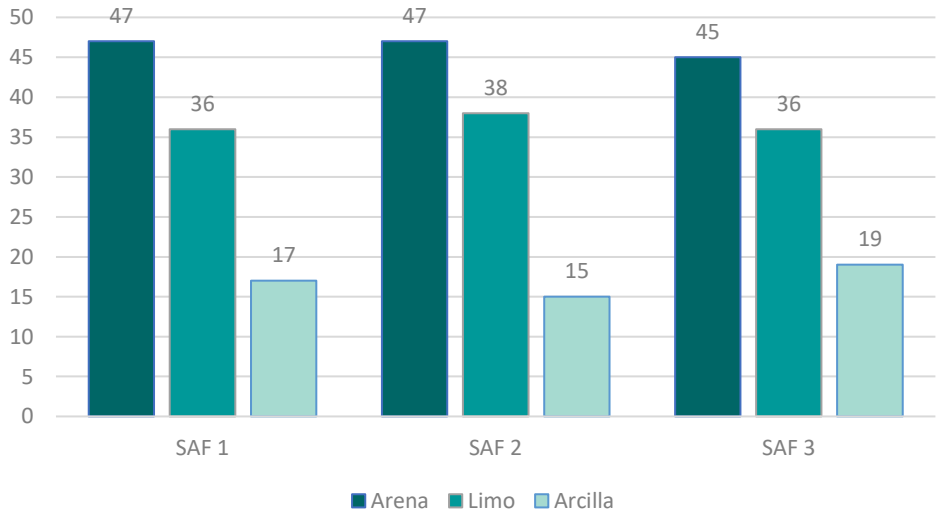
Propiedades físicas del suelo para el cultivo de *Coffea arabica* en tres sistemas agroforestales del predio Cananvalle provincia de Imbabura.

3.3.4.1 Textura

Las clases texturales de los tres sistemas agroforestales están compuestas por proporciones adecuadas de arena, limo y arcilla presentando así una textura franca, tal como se evidencia en la figura 6.

Figura 6

Clases texturales de los diferentes sistemas agroforestales del predio Cananvalle.



La textura del suelo influye en el drenaje, retención de agua y nutrientes, los tres sistemas agroforestales tienen predominio de arena con valores que varían entre 45 a 47,

mientras que como media concentración se encuentra el limo que tienen valores que van desde 36-38 y arcilla que oscilan entre 15 a 19, resultando en una clase franco para el SAF 1 y SAF3 para más detalle observar el anexo 2, mientras el SAF 2 se encuentra en una clase franco-arenosa que ofrece excelente drenaje y aireación evitando que el cultivo tenga estrés hídrico. Las proporciones de arena, limo y arcilla son adecuadas, al analizar el triángulo de textura USDA se determina que la clase textural franco es adecuada para el crecimiento y desarrollo del cultivo. En suelos colombianos en el departamento de Huila se encontraron al menos entre el 60 y 80% de los sitios evaluados fueron principalmente texturas arcillosas (encharcamiento, drenaje imperfecto y aireación limitante) (Shadeghian et al., 2008).

3.3.4.2. Densidad aparente, densidad real y porosidad.

Las propiedades físicas del suelo se encuentran detalladas en el anexo 2, los valores de densidad aparente en SAF 1 y SAF 2 (1,07 y 1,04 g/ml), mientras la densidad real para los tres sistemas agroforestales se encuentra entre 2,19 g/ml y 2,31 g/ml y la porosidad del suelo se encuentra entre un 43% y 54,89%.

Tabla 14

Propiedades físicas de tres sistemas agroforestales del predio de Cananvalle.

Parámetros	Unidad	SAF 1	SAF 2	SAF 3
Densidad Aparente (DA)	g/ml	1,07	1,04	1,24
Densidad Real (DR)	g/ml	2,22	2,31	2,19
Porosidad	%	51,81	54,89	43,37

Sadeghian et al., 2008) señala que para esta propiedad se consideran apropiados valores cercanos a 1,0 g/cm3 y no deseables aquellos superiores a 1,2 g/cm3 en contrastante con la presente investigación los resultados arrojados demuestran que los niveles de densidad aparente

para el SAF 1 y SAF 2 son ideales para el cultivo de café, sin embargo, el SAF3 cuenta con niveles superiores de DA lo cual podría crear consecuencias negativas en el sistema agroforestal. Mientras que la densidad real se encuentra entre los valores de 2 a 2.3 g/ml. La FAO (2010) menciona que la densidad real, de las partículas densas del suelo, varía con la proporción de elementos constituyendo el suelo y en general está alrededor de 2,65 lo cual es consecuente con los resultados obtenidos.

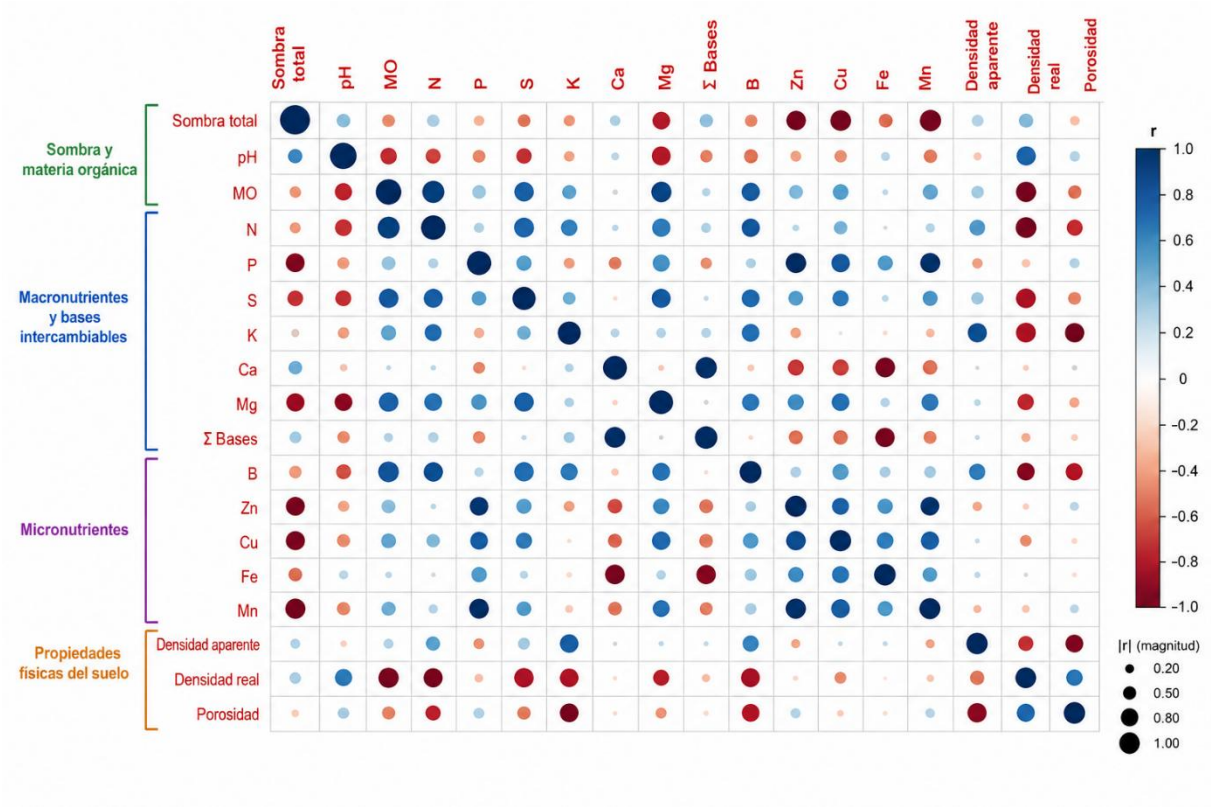
Los niveles de porosidad son superiores al 50%, lo que favorece la aireación y el crecimiento radicular (FAO, 2019). En contraste, SAF 3 presenta una densidad aparente mayor (1,24 g/ml) y una porosidad más baja (43,37%), indicando un suelo relativamente más compacto, con menor volumen de poros y potencial mayor restricción al desarrollo de raíces.

3.3.5. Relación entre niveles de sombra y parámetros edafológicos.

La relación entre el porcentaje de sombra total y las propiedades edafológicas permitió identificar tendencias de asociación entre la cobertura arbórea y las variables químicas y físicas del suelo. El análisis de correlación de Pearson mostró relaciones de distinta magnitud y dirección, las cuales deben interpretarse como asociaciones estadísticas y no necesariamente como relaciones causales. En general, la sombra total presentó correlaciones débiles a moderadas con algunas propiedades del suelo, lo que sugiere que la cobertura arbórea podría influir parcialmente en las condiciones edáficas de los sistemas agroforestales estudiados tal como se aprecia en la figura 7.

Figura 7.

Matriz de correlación de Pearson entre sombra total y variables edafológicas del suelo.



Nota. Los tonos azules indican correlaciones positivas y los tonos rojizos correlaciones negativas. El tamaño y la intensidad del color de los círculos representan la magnitud de la correlación: círculos grandes y oscuros indican relaciones más fuertes, mientras que círculos pequeños y pálidos indican relaciones débiles. La escala varía entre -1 y 1.

3.3.5.1. Correlación entre la sombra y el pH del suelo

La sombra total presentó una correlación positiva débil con el pH, lo que sugiere una ligera tendencia al incremento del pH en sitios con mayor cobertura arbórea. A mayor porcentaje de sombra, el pH del suelo debería aumentar (Figura 7). Silva, et al (2023) analizaron sistemas agroforestales en Nicaragua encontraron que el pH del suelo era mayor bajo los doseles coincidiendo con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Getachew et al. (2023) señala que la descomposición de la materia orgánica proporcionada por los árboles modifica las propiedades químicas del suelo.

3.3.5.2. Correlación entre la sombra y la materia orgánica del suelo

La materia orgánica mostró una correlación positiva débil con la sombra total, posiblemente asociada al aporte de hojarasca, ramas y residuos vegetales provenientes del dosel arbóreo Silva et al (2023).

3.3.5.3 . Correlación entre la sombra y los macro y micronutrientes del suelo

Algunos macro y micronutrientes, como P, S, Mg, Zn, Cu, Mn, B y Fe, presentaron correlaciones negativas con la sombra total, mientras que el Ca mostró una correlación positiva (Figura 7). Estas asociaciones deben interpretarse con cautela, ya que la disponibilidad de nutrientes depende también de pH, textura, manejo, humedad y dinámica de la materia orgánica.

Manson et al (2022) indican en su estudio que la sombra resultó ser menos influyente en la composición de la mayoría de los macro y micronutrientes (Aluminio, Hierro, Potasio, Calcio, Zinc y Magnesio).

La relación entre el porcentaje de sombra y los niveles de nitrógeno y potasio fue nula, es decir, en esta aproximación los nutrientes no fueron influenciados por los niveles de sombra. Le et al. (2022) realizaron un estudio en Vietnam, donde reportaron que los árboles de nombra no tuvieron efecto significativo sobre el nitrógeno, potasio total y potasio disponible en el suelo. Coincidiendo con lo obtenidos en esta investigación.

3.3.5.4. Correlación entre la sombra y las propiedades físicas del suelo

La densidad aparente mostró una relación débil o nula con la sombra total (Figura 7). En cambio, la porosidad y la densidad real presentaron correlaciones positivas moderadas, lo que indica una posible asociación entre mayor cobertura arbórea y cambios en la estructura física del suelo.

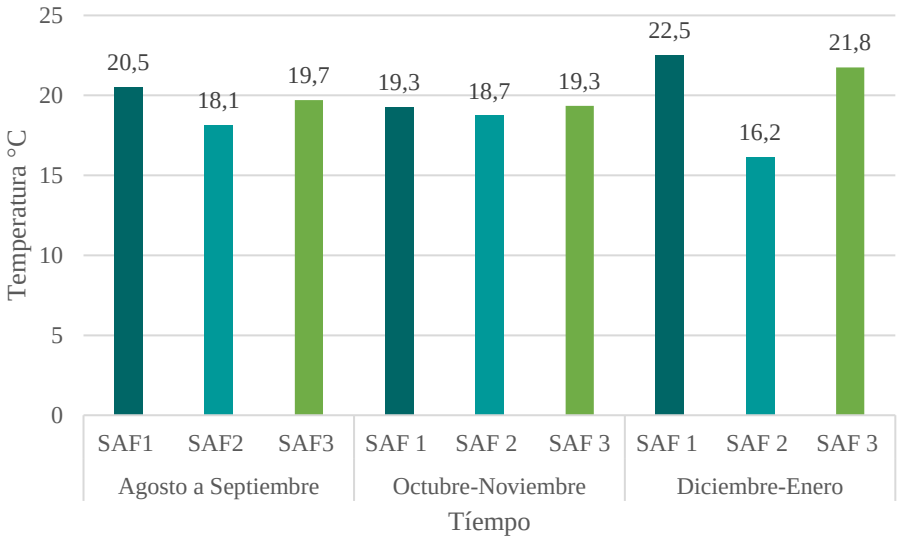
Mientras la densidad real muestra una correlación positiva moderada. A mayor sombra la densidad real aumenta también. Los resultados coinciden de manera parcial con Gaitán et al (2016) señalan que los sistemas con sombra presentan menor densidad aparente y mayor porosidad en comparación con los sistemas sin sombra.

3.3.6. Parámetros climáticos

Los parámetros climáticos evaluados dentro de los tres sistemas agroforestales fueron la temperatura (°C), humedad (%) y precipitación (mm), obtenidos en el periodo de agosto 2025 y enero 2026 lo que se puede evidenciar en la figura 8, 9 y 10.

Figura 8.

Temperatura promedio de tres sistemas agroforestales



La temperatura media registrada en tres sistemas agroforestales durante el periodo de estudio, refleja una variación entre 16,2°C hasta un máximo de 22,5 °C.

Durante los meses de agosto y septiembre, el SAF1 registró la temperatura más alta, mientras el SAF2 se mantuvo como el más fresco, con una variación de 2,4°C entre ambos. Mientras el SAF3 se encontraba en un punto intermedio, probablemente influenciado por la inclinación de la ladera y sobre todo por el alto porcentaje de sombra, generados por árboles de *Persea americana* y la cortina rompevientos perteneciente a otro bloque.

En el segundo periodo comprendido de octubre a noviembre se observó mayor estabilidad de temperaturas entre los sistemas. El SAF 1 y SAF3 registraron temperaturas muy similares, mientras que el SAF 2 se diferenció solo en 0,6°C.

Para el tercer periodo que va de diciembre a enero fue el que presentó los cambios más marcados, coincidiendo con la temporada de lluvias. El SAF1 alcanzó el pico elevado, seguido del SAF3. La mayor diferencia se registró entre el SAF1 Y SAF2 con 6,3 °C de diferencia.

En general el SAF2 fue el sistema más estable a lo largo del estudio, lo que se atribuye a una mejor distribución y diversidad de diferentes especies forestales. Por otra parte, el SAF3 muestra niveles de temperatura intermedios con una tendencia similar al SAF1, este sistema tiende a ser más cálido indicando la influencia de los individuos arbóreos que complementan el cultivo de café, ya que las copas de los árboles son más abiertas y menos densas.

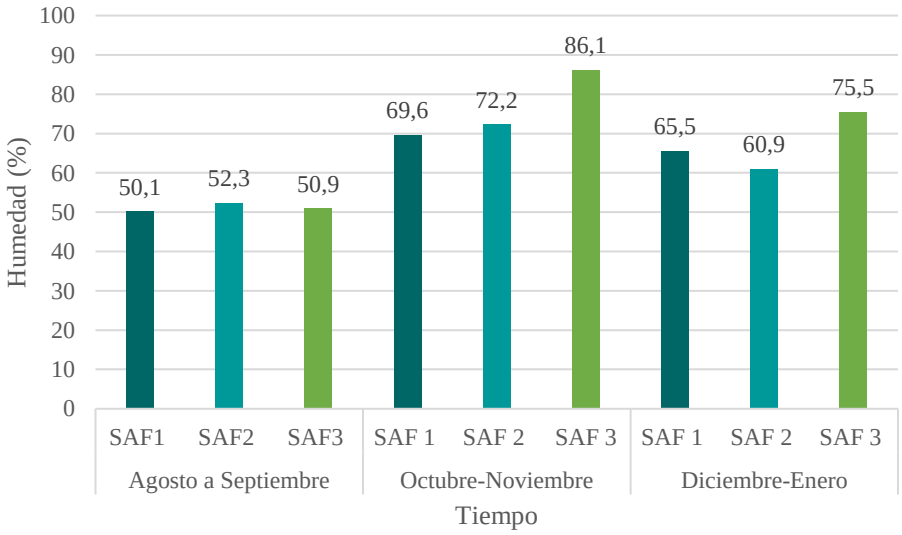
El mayor contraste térmico ocurrió entre diciembre y enero, donde se registran un pico de calor de 22,2 °C seguido inmediatamente por la caída más drástica a 16,2 °C. Estos datos indican que el SAF2 tiende a retener más calor mientras que el SAF3 es más fresco. Finalmente, el ciclo termina manteniendo todos los registros por encima de los 19 °C, lo que indica el cierre con condiciones relativamente cálidas. De acuerdo con los resultados obtenidos por Velasco et al, (2001) en un estudio realizado tomando como referencia 600 W/m2, obtuvo temperaturas

superiores a 24°C, valor muy acercado a los obtenidos en los predios de Cananvalle en un rango de (16-22 °C).

La temperatura media anual óptima para la producción del café (*Coffea arabica*) se sitúa entre los 19-21,5 °C, que oscilan diariamente entre los 10-13°C (Gómez-Aristizabal y Suarez- Serrato, 1979 y MINCYT, 2024). La temperatura registrada en los sistemas agroforestales analizados, demuestran que la zona de estudio presenta temperatura (16°C y 22°C) ideal para el desarrollo cultivo de café.

Figura 9

Humedad relativa promedio en tres sistemas agroforestales.



La humedad relativa promedio registrada en los tres sistemas agroforestales mostró una variación importante a lo largo del periodo del estudio, oscilando entre 50,1% y 86,1%.

Durante los meses de agosto a septiembre, los tres sistemas presentaron valores relativamente bajos y similares de humedad, ubicándose entre el SAF1 (50,1%), SAF2 (52,3%) y SAF3 (50,9%). Esta similitud sugiere condiciones climáticas comparables en los tres sistemas durante este periodo, posiblemente influenciadas por la época seca.

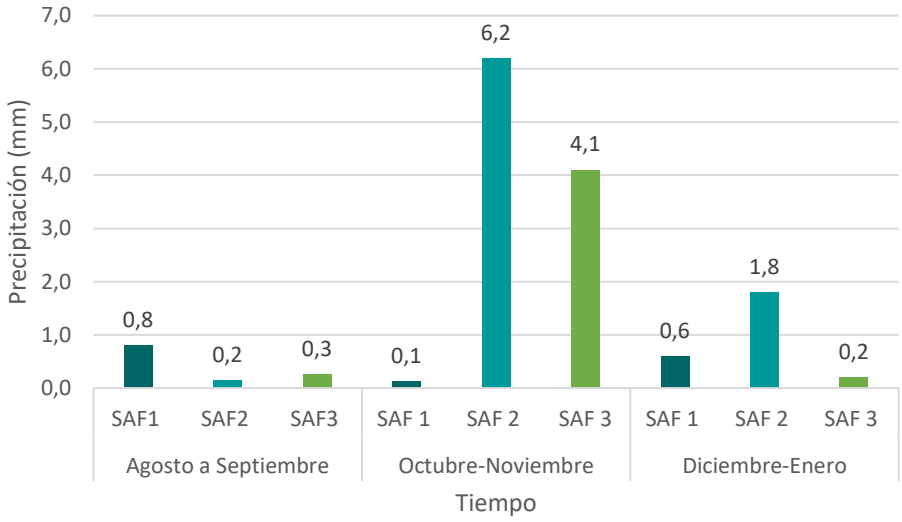
En el segundo periodo de octubre a noviembre, se observó un incremento notable en la humedad en todos los sistemas. El SAF3 alcanzó el valor más alto (86,1%), seguido del SAF2 (72,2%) y el SAF1 (69,9%). Este aumento coincide con el inicio de la temporada de lluvias, destacando especialmente el SAF3, probablemente debido a su mayor cobertura arbórea con *Persea americana* y la presencia de la cortina rompevientos, factores que favorecen la retención de humedad.

Para el tercer periodo entre diciembre y enero, la humedad se mantuvo elevada, aunque con una ligera disminución respecto al periodo anterior. El SAF3 continuó mostrando los valores más altos (75,5%), mientras que el SAF2 presentó el valor más bajo (60,9%). Mientras el SAF1 se ubicó en una posición intermedia con 65,3%.

En términos generales el SAF3 fue el que registró consistentemente los mayores niveles de humedad a lo largo del estudio, especialmente durante la temporada lluviosa. Este comportamiento se atribuye a la densidad de árboles y sombra que reduce el ingreso de luz y por ende el proceso de evapotranspiración y favorece a la conservación de la humedad relativa. Estos resultados son similares con los obtenidos por Escalada-Cordova et al. (2024) realizaron un estudio en Loja, Ecuador donde la humedad relativa siempre fue mayor en el interior de los sistemas agroforestales valores que varían entre el 70% y 77% en comparación con las áreas expuestas al sol.

Figura 10

Precipitación promedio de tres sistemas agroforestales en cuatro periodos de tiempo.



Quiñones-Huatangari et al. (2022) en sistemas de cultivo de café en Ecuador, Costa Rica y Nicaragua, los niveles de precipitación anual oscilan entre 910 mm y 2740 mm lo que sugiere un rango amplio dependiendo de las condiciones locales y los sistemas de cultivo (agroforestales o monocultivos). En promedio semanalmente se convertiría en 25 mm. Sin embargo, el cambio climático a afectado radicalmente a países de centro américa países que son los principales productores de café, con una tendencia hacia una disminución de la precipitación, observándose una disminución de 0,9 mm diarios en los últimos 30 años (Torres, et al. 2022).

La precipitación promedio registrada en los tres sistemas agroforestales presentó una alta variabilidad a lo largo del periodo del estudio, con valores que varían entre 0,1 mm y 6,2 mm. Estos datos revelan un comportamiento muy diferenciado entre los sistemas y los periodos evaluados.

Durante los meses de agosto a septiembre, la precipitación fue muy baja en los tres sistemas. El SAF1 registró el valor más alto (0,8 mm), seguido del SAF3(0,3 mm) y el SAF2

(0,2 mm). Esta baja precipitación es consistente con la época seca del año y explica los bajo niveles de humedad relativa observados en el mismo periodo.

En el segundo periodo de octubre y noviembre, se registró el mayor evento de precipitación de todo el estudio. El SAF2 presentó un valor notablemente alto (6,2 mm), seguido del SAF3 con 4,1mm, mientras que el SAF1 prácticamente no presentó precipitación (0,1mm). Está diferencia sugiere que el SAF2 y, en menor medida, el SAF3 tuvieron mayor retención de agua durante este periodo, posiblemente debido a la mayor densidad y distribución de su componente arbóreo.

Para el tercer periodo de diciembre a enero, la precipitación disminuyó considerablemente en todos los sistemas. El SAF2 mantuvo el valor más alto (1,8mm), mientras que el SAF1 registró 0,6mm y el SAF 3 solo 0,2 mm. Esta reducción coincide con el final de la temporada de lluvias y explica la ligera disminución de humedad observada en el mismo intervalo.

El SAF2 fue el sistema que registró un mayor nivel de precipitación durante el estudio, destacándose especialmente en los periodos de octubre a noviembre y diciembre a enero. Este comportamiento puede estar relacionado con la distribución de especies y la arquitectura de las especies forestales que favorecen a la retención de agua. Seguido el SAF3 mostró un comportamiento intermedio a alto durante la temporada de invierno, además de estar influenciada por la densidad de árboles. En este contraste. El SAF1 presentó valores más bajos de precipitación, lo que indica que existe mayor exposición a la radiación solar.

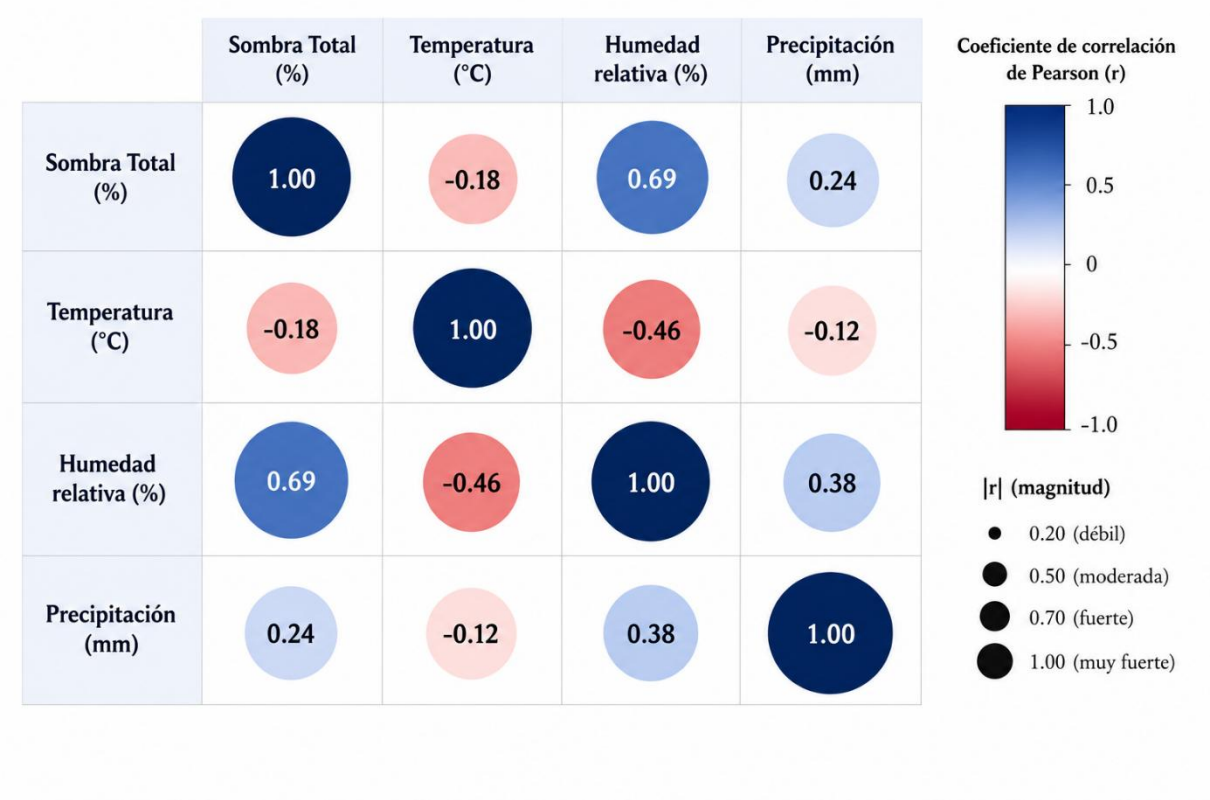
3.3.7. Relación entre porcentaje de sombra y parámetros climáticos

El análisis de correlación de Pearson permitió evaluar la asociación entre el porcentaje de sombra total y las principales variables climáticas registradas en los tres sistemas

agroforestales. Los resultados evidencian que la magnitud y dirección de las correlaciones difieren entre las variables analizadas, observándose asociaciones positivas y negativas de distinta intensidad (Figura 11). En términos generales, una mayor cobertura de sombra tendió a asociarse con un incremento de la humedad relativa y una ligera disminución de la temperatura, mientras que la relación con la precipitación fue positiva, aunque de baja magnitud.

Figura 11

Relación de sombra total y los parámetros climáticos.



Nota. El gráfico corresponde a una matriz de correlación de Pearson con valores comprendidos entre −1 y 1. Los círculos de color azul representan correlaciones positivas y los de color rojo correlaciones negativas. El tamaño e intensidad del color de cada círculo son proporcionales a la magnitud del coeficiente de correlación, donde los círculos de mayor tamaño y tonalidad más intensa indican asociaciones más fuertes.

3.3.7.1. Correlación entre la sombra y la temperatura, humedad y precipitación

La correlación entre la sombra total y la temperatura fue débil y negativa, lo que indica una ligera tendencia a la disminución de la temperatura conforme aumenta la cobertura arbórea.

Por el contrario, la humedad relativa presentó una correlación positiva fuerte, sugiriendo que los sistemas con mayor porcentaje de sombra tienden a conservar una mayor humedad ambiental durante los periodos de lluvia.

La relación entre la sombra y la precipitación fue positiva, pero de baja magnitud, lo que indica una asociación limitada entre ambas variables en las condiciones evaluadas. Este comportamiento sugiere que la precipitación responde principalmente a factores climáticos regionales, mientras que la cobertura arbórea influye con mayor intensidad sobre las condiciones micro climáticas del sistema, particularmente en la regulación de la temperatura y la humedad relativa.

Los resultados concuerdan con lo señalado por Montagnini et al. (2015), quienes destacan que los sistemas agroforestales modifican el microclima bajo el dosel arbóreo, favoreciendo ambientes más frescos y húmedos. Estas condiciones pueden beneficiar el desarrollo del cultivo; sin embargo, también pueden generar ambientes propicios para determinadas plagas y patógenos, con posibles efectos indirectos sobre el rendimiento

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Se caracterizaron los tres sistemas agroforestales evaluados, identificándose diferencias en su estructura y composición florística. Los sistemas presentaron una baja diversidad de especies, con predominio de *Coffea arabica* como componente principal y distintas especies arbóreas de sombra. Asimismo, los porcentajes de sombra total generada por el componente arbóreo fueron de 67,52 % en el SAF1, 77,61 % en el SAF2 y 82,76 % en el SAF3, evidenciando diferentes niveles de cobertura arbórea entre los sistemas.

2. La auto sombra generada por el cafeto fue cuantificada mediante variables dasométricas y el cálculo del área de copa, permitiendo estimar su aporte a la cobertura total del sistema. La incorporación de esta variable proporcionó una caracterización más precisa del nivel de sombreado presente en cada sistema agroforestal y permitió diferenciar el efecto de la cobertura arbórea del generado por el propio cultivo.

3. La cobertura arbórea presentó asociaciones con varias propiedades edáficas y condiciones micro climáticas. Se observaron correlaciones positivas con el pH, la materia orgánica, la porosidad y el calcio, mientras que el fósforo, el azufre y algunos micronutrientes presentaron correlaciones negativas. En contraste, el nitrógeno, el potasio y la densidad aparente no evidenciaron una relación clara con la sombra. Además, una mayor cobertura arbórea estuvo asociada con una ligera disminución de la temperatura y un incremento de la humedad relativa, lo que confirma la importancia de la sombra en la regulación del microclima de los sistemas agroforestales con café.

Recomendaciones

1.Implementar un programa permanente de monitoreo de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo mediante análisis periódicos (preferentemente una vez por año o antes y después de realizar enmiendas o fertilizaciones), con el fin de ajustar oportunamente el manejo nutricional de los cafetales.

2.Mantener niveles adecuados de cobertura arbórea que permitan conservar condiciones micro climáticas favorables sin reducir significativamente la disponibilidad de luz para el cultivo, evaluando en futuras investigaciones el porcentaje óptimo de sombra para maximizar simultáneamente la productividad y la sostenibilidad del sistema.

3.Complementar futuras investigaciones con mediciones de productividad del café, calidad física y sensorial del grano, contenido de carbono del suelo, actividad microbiológica, humedad del suelo y capacidad de intercambio catiónico, para comprender de manera integral el funcionamiento de estos sistemas agroforestales.

4.Replicar este tipo de estudios en otras zonas cafetaleras del Ecuador, considerando diferentes especies arbóreas, edades del cafetal y condiciones ambientales, con el propósito de generar recomendaciones técnicas aplicables a distintas regiones productoras.

5.Promover el manejo agroforestal como una estrategia de adaptación al cambio climático, debido a su capacidad para regular el microclima, conservar la fertilidad del suelo y aumentar la resiliencia de los sistemas de producción de café.

BIBIOGRAFÍA

Amaya Gonzáles, Y., Caballero Cruz, P., Luna Robles, E. O., Sánchez Medrano, F. Z., Manzanilla Quijada, G. E., & Villalón Mendoza, H. (2019). Evaluación del microclima en un sistema silvopastoril en montemorelos, Nuevo León, México. Foresta Veracruzana, 21(1), 19-22.

Andrade, H. J., & Segura, M. A. (2016). *Dinámica de la sombra de Cordia alliodora en sistemas agroforestales con café en Tolima, Colombia. Agronomía Costarricense*, 40(2), 77–86. https://doi.org/10.15517/rac.v40i2.27387

Angulo Urquia, J. C. (2015). *Relación entre el diámetro de copa y del fuste de Cedrelinga cateniformis (Ducke) Ducke, en la zona de Atalaya, Región Ucayali*.

Añazco Romero, M. J., Vallejos Álvarez, H. V., & Erazo García, N. M. (2024). *Aliso de Nepal: Alnus nepalensis D. Don. en el Ecuador: Ecología, silvicultura y economía*. CIDE Editorial. https://doi.org/10.33996/cide.ecuador.AN2636454

Arana Meza, V.H. (2003). *Dinámica del nitrógeno en un sistema de manejo orgánico de café (Coffea arabica L.) asociado con Poró [Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook]*. Tesis MagSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 118 p.

Arévalo-Gardini, E., Canto, M., Alegre, J., Loli, O., Julca, A., et al. (2015). Changes in Soil Physical and Chemical Properties in Long Term Improved Natural and Traditional Agroforestry Management Systems of Cacao Genotypes in Peruvian Amazon. *PLOS ONE*, 10(7): e0132147. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132147

Avendaño-Arrazate, Carlos Hugo, Suárez-Venero, Gicli Manuel, Mendoza-López, Alexander, Martínez-Bolaños, Misael, Reyes-Reyes, Jorge, & Espinosa-Zaragoza, Saúl. (2021). Composición arbórea de especies asociadas al cacao: selva Lacandona y sistemas agroforestales, Chiapas, México. Agronomía Mesoamericana, 32(2), 365-381. https://dx.doi.org/10.15517/am.v32i2.41630

Avelino, J., & Rivas, G. (2013). *La roya anaranjada del cafeto*. HAL. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036

Baraër, T. (2013) Déterminants du cycle de l'azote dans des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652007000100013

Busato, C., dos Reis, E. F., Oliveira, M. G., de OliveiraGarcia, G., Busato, C. C. M., & Partelli, F. L. (2023).Acumulación de nutrientes e índices de clorofila enCoffea canephora como respuesta a las dosis de nitrógeno.Cultivos Tropicales, 44(4), 1-11

Celi-Delgado, L., & Aguirre-Mendoza, Z. (2022). Caracterización de los sistemas agroforestales tradicionales de la parroquia Zumba, cantón Chinchipe, Ecuador. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6(4), 814-837. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2626

Calderón-Medina, Claudia L, Bautista-Mantilla, Gina P, & Rojas-González, Salvador. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. ORINOQUIA, 22(2), 141-157. https://doi.org/10.22579/20112629.524

Capa Mora, E. D. (2015). *Efecto de la fertilización orgánica y mineral en las propiedades del suelo, la emisión de los principales gases de efecto invernadero y en las diferentes fases fenológicas del cultivo de café (Coffea arabica L.)*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Agrónomos (UPM). https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.36539

Cassamo, C. T., Draper, D., Romeiras, M. M., Marques, I., Chiulele, R., et al. (2023). Impact of climate changes in the suitable areas for *Coffea arabica* L. production in Mozambique: Agroforestry as an alternative management system to strengthen crop sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 346, 108341. https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108341

Castellanos, J. Z. (2014). Acidez del Suelo y su Corrección. Hojas Técnicas de Fertilab, México. 4 p. https://www.intagri.com/articulos/suelos/manejo-y-correccion-de-acidez-de-suelo

Cazco, K. E. (2015). *Efectos del tipo de sombra en la escorrentía y erosión en el sistema agroforestal café en la microcuenca Santa Inés, Honduras*. (Doctoral dissertation, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano).

Chialva, M., Patono, D. L., Pérez de Souza, L., Novero, M., Vercellino, S., et al. (2023). El eje micorrízico raíz-brote provoca el crecimiento de *Coffea arabica* en condiciones de bajo contenido de fosfato. *New Phytologist*. https://doi.org/10.1111/nph.18946

DaMatta, F., & Rodríguez, N. (2007). Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotrópico: una visión agronómica y ecofisiológica. *Agronomía Colombiana*, 25(1), 113-123. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652007000100013&lng=en&tlng=es

Degefu, M. A., & Efa, F. A. (2025). Plant species diversity and farmers' preferences in home garden agroforestry systems for environmental sustainability in Southwest Ethiopia. Environmental and Sustainability Indicators, 28, Article 100976. https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100976

Duval, V. S., Benedetti, G. M., & Baudis, K. (2020). El impacto del arbolado de alineación en el microclima urbano. Bahía Blanca, Argentina. *Investigaciones Geográficas*, (73), 171–188. https://doi.org/10.14198/INGEO2020.DBB

Ehrenbergerová, L., Klimková, M., Cano, Y. G., Habrová, H., Lvončík, S., et al. (2021). Does Shade Impact Coffee Yield, Tree Trunk, and Soil Moisture on *Coffea canephora* Plantations in Mondulkiri, Cambodia? *Sustainability*, 13(24), 13823. https://doi.org/10.3390/su132413823

Ertiftik, H., & Zengin, M. (2017). Response of maize for grain to potassium and magnesium fertilizers in soils with high lime contents. Journal of Plant Nutrition, 40(1), 93–103. https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1201493

Valles Cisneros, E. M. (2021). *Determinar el nivel de sombra de Coffea Arabica en asocio con Alnus Nepalensis D. Don. En la parroquia Seis de Julio De Cuellaje, norte del Ecuador* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Recuperado de https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10944

Farfán-V., F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café*. Manizales, Caldas, Colombia.

FAO. (2019). *Propiedades Químicas del Suelo. Portal de Suelos FAO*. https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/

Fernández-Cortés, Y., Sotto-Rodríguez, K. D., & Vargas-Marín, L. A. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*, 15(1), 93-110. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552020000100093

Ferrás Negrín, Y., Bustamante González, C. A., Pérez Salina, V., Esmoris, C. S., & Espinosa, R. R. (2025). Contenidos de micronutrientes en variedades de Coffea arabica L. en la localidad cafetalera de Jibacoa. Café Cacao, 44(1), 1-5.

Fertilab (2019). La salinidad del suelo y su fertilidad. https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/NTF-19-025-La-salinidad-del-suelo-y-su-fertilidad.pdf

Garza-Lau, R., Maldonado-Torres, R., Álvarez-Sánchez, M. E., & Torres-Rivera, J. A. (2020). Caracterización de especies arbóreas asociadas al cultivo de café. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(1), 25-32. https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2210

Getachew, M., Verheyen,K., Tolassa, K., Tack, A, Hylander, K., Ayalew, B., Boeckx, P., Landuyt, D., & De Frenne, P. (2023). Efectos de las especies de árboles de sombra en la biogeoquímica del suelo y la calidad de los granos de café en el café de plantación. Agricultura, Ecosistemas y Medio Ambiente, 347, Articulo 108354. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108354

Gómez-Guerrero, A., Correa-Díaz, A., & Castruita-Esparza, L. U. (2021). Cambio climático y dinámica de los ecosistemas forestales. *Revista fitotecnia mexicana*, 44(4), 673-682. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802021000400673

INTAGRI. 2018. Disponibilidad de Nutrimentos y el pH del Suelo. Serie Nutrición Vegetal. Núm. 113. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 4 p. https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrimentos-y-el-ph-del-suelo

Julca-Otiniano, Alberto, Meneses-Florián, Liliana, Blas-Sevillano, Raúl, & Bello-Amez, Segundo. (2006). LA MATERIA ORGÁNICA, IMPORTANCIA Y EXPERIENCIA DE SU USO EN LA AGRICULTURA. *Idesia (Arica)*, *24*(1), 49-61. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009

Le, Q. V., Cowal, S., Jovanovic, G., & Le, D.-T. (2021). A Study of Regenerative Farming Practices and Sustainable Coffee of Ethnic Minorities Farmers in the Central Highlands of Vietnam. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5:712733. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.712733

Lin, B. B. (2009). Coffee (Café arabica var. Bourbon) Fruit Growth and Development Under Varying Shade Levels in the Soconusco Region of Chiapas, Mexico. Journal of Sustainable Agriculture, 33(1), 51–65. https://doi.org/10.1080/10440040802395007

López-Carmona, D., Zúñiga, F. B., & Bautista-Hernández, D. A. (2023). Identificación de las propiedades del suelo asociadas a la percepción campesina de la idoneidad de la tierra para el cultivo de café orgánico. *Agroecología y Sistemas Alimentarios Sostenibles*, 48(2), 161–182. https://doi.org/10.1080/21683565.2023.2280770

Lucero Ignamarca, A., Muñoz Sáez, F., Cancino Cancino, J., Sotomayor Garretón, A., Dube, F., Sáez Carrillo, K., … Navarrete Torres, M. (2019). La cobertura arbórea de Acacia caven sobre la calidad de la pradera y microclima en un sistema silvopastoril de Chile central. Madera Y Bosques, 25(2). https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521811

Margalef, R. (1951). Diversidad de especies en las comunidades naturales. Publicación del Instituto Biología Aplicada. Barcelona, (9): 5-27.

Martínez-Toledo, Ricardo, Ponce-Donoso, Mauricio, & Vallejos-Barra, Óscar. (2023). La influencia de los árboles en el microclima en un paseo peatonal de la ciudad de Talca (Chile). Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 20(46), 27-35. https://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v20i46.6601

Martin, D. A. (2020). *Smallholder vanilla agroforestry in Madagascar: Biodiversity, ecosystem services and yields in a land-use context* (Doctoral dissertation). Georg-August-Universität Göttingen.

Manson, S.; Nekaris, K.A.I.; Rendell, A.; Budiadi, B.; Imron, M.A.; Campera, M. Agrochemicals and Shade Complexity Affect Soil Quality in Coffee Home Gardens. Earth 2022, 3, 853–865. https://doi.org/10.3390/ earth3030049

Mascaró, L., & Mascaró, J. (2009). Ambiêncie urbana (3ª ed.). Masquatro.

Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., & Eibl, B. (2015). *Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales*. Serie técnica. Informe técnico 402. CATIE; CIPAV.

Morales Peña, V. H., Mora Garcés, A., Virginio Filho, E. D. M., & Villatoro Sánchez, M. (2024). Growth and productivity of Coffea arabica var. Esperanza L4A5 in different agroforestry systems in the Caribbean region of Costa Rica. Agriculture, 14(10), 1723. https://doi.org/10.3390/agriculture14101723

Muñoz-Villers, L. E., Geris, J., Alvarado-Barrientos, M. S., Holwerda, F., & Dawson, T. (2020). El café y los árboles de sombra muestran el uso complementario del agua del suelo en un ecosistema agroforestal tradicional. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 1649–1668. https://doi.org/10.5194/hess-24-1649-2020

Mulatu, K., Hundera, K., & Senbeta, F. (2025). Analysis of Forest Cover Change in the Southwest Ethiopia. *International Journal of Forestry Research*. https://doi.org/10.1155/ijfr/5523008

Nasiro Abdulkadir, K. (2024). The benefits of agroforestry coffee production systems: A review. *World Journal of Food Science and Technology*, 8(4), 86–105. https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.13

Ospina Ante, A. (2006). Agroforestería: aportes conceptuales, metodológicos y prácticos. Asociación del Colectivo de Agroecología del Suroccidente Colombiano (ACASOC).

Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M., & Schroth, G. (2015). Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to

Climate Change. *PLOS ONE*, 10(4): e0124155. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155

Palma-López, D. J., & Sánchez-Hernández, R. (Comps.). (2023). Uso y manejo del suelo (Vol. 3). En F. Bautista & F. Ayala (Eds.), Hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso suelo (311 pp.). Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo.

Pérez Camargo , L. E., & Suárez Campos, L. A. (2011). Evaluación del efecto sombra en la producción de café –Coffea arabica L. - dentro de un sistema agroforestal tradicional con árboles en Las Minas, El Paraíso, Honduras. Zamorano Honduras.

Pico-Mendoza, J., Pinoargote, M., Carrasco, B., & Limongi Andrade, R. (2020). Servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales cafetaleros certificados y no certificados en Costa Rica. *Agroecología y Sistemas Alimentarios Sostenibles*, 44(7), 902–918. https://doi.org/10.1080/21683565.2020.1713962

Pico Rosado, J. T. (2014). Efecto de la sombra del café y el manejo sobre la incidencia, severidad, cantidad de inóculo y dispersión de Hemileia vastatrix en Turrialba, Costa Rica [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio Institucional CATIE. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7054

Pulleman, M. M., Rahn, E., & Valle, J. F. (2024). *Agricultura regenerativa para sistemas cafeteros resilientes y con bajas emisiones de carbono: Una guía práctica*. CIAT. https://hdl.handle.net/10568/141572

Ríos, M., & González, P. (2024). Effect of shade trees on ecosystem services in coffee plantations. Agronomía Mesoamericana, 35(2), 1-18. https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ragromeso/article/view/8427/12334

Ruiz García, P., Gómez Díaz, J. D., Valdes Velarde, E., & Monterroso Rivas, A. I. (2020). Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable. *Revista Ra Ximhai*, 16(4 Especial), 137–158. https://doi.org/10.35197/rx.16.04.2020.07.pr

Sadeghian, S., Alarcón, V., Díaz, V., Lince, L., & Rey, J. (2008). Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila. https://doi.org/10.38141/10791/0005_4

Salamanca, L. A. (2017). Evaluación de la producción de café bajo sombra con especies arbóreas en el municipio de Pajarito. UNAD. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13725

Silva, J., González, M., & Rodríguez, A. (2023). Sistemas agroforestales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4779/sistemas_agroforestales.pdf

Somarriba, E., Zamora, R., Barrantes, J., et al. (2023). ShadeMotion: patrones de sombra de árboles en sistemas agroforestales de café y cacao. *Sistema Agroforestal*, 97, 31–44. https://doi.org/10.1007/s10457-022-00784-1

Soto-Pinto, L., Perfecto, I., Castillo-Hernandez, J., & Caballero-Nieto, J. (2000). Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of Chiapas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80(1–2), 61-69. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00134-1

Tariq, A., Graciano, C., Sardans, J., Ullah, A., Zeng, F., Ullah, I., Ahmed, Z., Ali, S., Al-Bakre, D. A., Zhang, Z., Bai, Y., Wang, W., & Peñuelas, J. (2022). *Decade-long unsustainable vegetation management practices increase macronutrient losses from the plant-soil system in the Taklamakan Desert.* *Ecological Indicators, 145*, 109653. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109653

Turbay, S., Nates, B., Jaramillo, F., Vélez, J. J., & Ocampo, O. L. (2014). Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de Colombia. *Investigaciones Geográficas*, (85), 95-112. https://doi.org/10.14350/rig.42298

Valles Cisneros, E. M. (2021). *Determinar el nivel de sombra de Coffea Arabica en asocio con Alnus Nepalensis D. Don. En la parroquia Seis de Julio De Cuellaje, norte del Ecuador* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Recuperado de https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10944

Villarreyna Acuña, R. A., Van den Meersche, K., Rapidel, B., & Avelino, J. (2016). Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo, en sistemas agroforestales con café. *CATIE*, 36 p.

Villavicencio Enríquez, L. (2006). *Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal rusticano de café*. Red Agrociencia. https://elibro.net/es/ereader/utnorte/18923?page=9

Virginio, E., Figueroa, H., Angamarca, M., & Paredes, N. (2018). El rol de los sistemas agroforestales en la conservación, recuperación y manejo de los suelos. *INIAP, Sacha*, cap. 10, 1–13.

Zhang, M., Liu, N., Harper, R., Li, Q., Liu, K., et al. (2017). A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales. *Journal of Hydrology*, 546, 44–59. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.040

Zaro, G. C., Caramori, P. H., Yada Junior, G. M., et al. (2020). Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees in Brazil. *Agroforestry Systems*, 94, 799–809. https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z

ANEXOS

Anexo 1

Resultados de propiedades físicas y químicas del suelo.

Análisis	pH		N		P		S		B		K		Ca		Mg		Zn		Cu		Fe		Mn		Ca/Mg	Mg/K	Ca+Mg/K	Σ Bases	MO		CO.*	Textura (%)				IDENTIFICACIÓN
Unidad			ppm		ppm		ppm		ppm		meq/ 100g		meq/ 100g		meq/ 100g		ppm		ppm		ppm		ppm					meq/ 100g	%		%	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	
25-1341	8,22	Me Al	35,94	M	67,23	A	32,85	A	1,39	M	0,84	A	52,51	A	8,73	A	6,0	M	3,1	M	92	A	83,0	A	6,01	10,43	73,15	62,08	4,12	A		47	36	17	FRANCO	MUESTRA 1 SAF1
25-1342	8,49	Me Al	14,28	B	67,50	A	16,96	M	0,98	B	0,44	A	38,75	A	7,00	A	8,1	A	3,1	M	90	A	80,8	A	5,53	15,87	103,66	46,19	1,82	M		57	30	13	FRANCO-ARENOSO	MUESTRA 2 SAF2
25-1343	8,34	Me Al	41,05	M	33,01	A	32,51	A	1,91	M	1,27	A	42,71	A	8,26	A	3,1	M	3,7	M	84	A	68,4	A	5,17	6,50	40,16	52,24	5,02	A		47	38	15	FRANCO	MUESTRA 3 SAF1
25-1344	8,23	Me Al	40,37	M	169,05	A	42,62	A	1,94	M	0,77	A	34,57	A	9,97	A	20,65	A	6,7	A	121	A	126,6	A	3,47	12,89	57,61	45,31	4,17	A		45	36	19	FRANCO	MUESTRA 4 TESTIGO

Análisis	Al+H*	Al*	Na*	C.E.	N. Total*	N-NO3*	K H2O*	P H2O*	Cl*	pH KCl*	HG	IDENTIFICACION
	ppm	ppm	meq/ 100g		%	ppm	meq/ 100g	ppm	ppm		%	

Anexo 2

Resultados de propiedades físicas del suelo.

CÓDIGO DE MUESTRA LABORATORIO	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO DE LA MUESTRA	PARÁMETRO ANALIZADO	MÉTODO	UNIDAD	RESULTADO
016-25-03440	**SAF 1 (Vachellia macracantha + Coffea arabica)**	Densidad Aparente	Gravimétrico PEE/SFA/23	g/ml	1,07
016-25-03440	**SAF 1 (Vachellia macracantha + Coffea arabica)**	Densidad Real	Picnómetro PEE/SFA/25	g/ml	2,22
016-25-03440	**SAF 1 (Vachellia macracantha + Coffea arabica)**	Porosidad	Cálculo PEE/SFA/25	%	51,81
016-25-03441	**SAF2(Cordia alliodora+ Coffea arabica)**	Densidad Aparente	Gravimétrico PEE/SFA/23	g/ml	1,04
016-25-03441	**SAF2(Cordia alliodora+ Coffea arabica)**	Densidad Real	Picnómetro PEE/SFA/25	g/ml	2,31
016-25-03441	**SAF2(Cordia alliodora+ Coffea arabica)**	Porosidad	Cálculo PEE/SFA/25	%	54,89
016-25-03442	**SAF 3 (Persea americana + Coffea arabica)**	Densidad Aparente	Gravimétrico PEE/SFA/23	g/ml	1,24
016-25-03442	**SAF 3 (Persea americana + Coffea arabica)**	Densidad Real	Picnómetro PEE/SFA/25	g/ml	2,19
016-25-03442	**SAF 3 (Persea americana + Coffea arabica)**	Porosidad	Cálculo PEE/SFA/25	%	43,37
016-25-03443	**SITIO 4(TESTIGO)**	Densidad Aparente	Gravimétrico PEE/SFA/23	g/ml	1,10
016-25-03443	**SITIO 4(TESTIGO)**	Densidad Real	Picnómetro PEE/SFA/25	g/ml	2,20
016-25-03443	**SITIO 4(TESTIGO)**	Porosidad	Cálculo PEE/SFA/25	%	50,16

Anexo 3

Medición de porcentaje de sombra.



Anexo 4

Instalación de termohigrómetro en los sistemas agroforestales.



Anexo 5

Toma de muestras de suelo para análisis de propiedades físicas y químicas.



Anexo 6

Empaquetado de muestras de suelo

