



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería Ambiental

Evaluación de sistemas agroforestales de café en ecosistemas de la provincia de Loja a través de los Índices de calidad del suelo (ICS) basados en servicios ecosistémicos

**Trabajo de Integración Curricular
previa a la obtención del título de
Ingeniera Ambiental**

AUTOR:

Brenda del Cisne Guazha Romero

DIRECTOR:

Ing. Carlos Guillermo Chunchu Morocho, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2023

Educamos para **Transformar**

Certificación

Loja, 7 de abril de 2025

Ing. Carlos Guillermo Chunchu Morocho, Mg. Sc

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

C E R T I F I C O:

Que he revisado y orientado todo el proceso de la elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Evaluación de sistemas agroforestales de café en ecosistemas de la provincia de Loja a través de los Índices de calidad del suelo (ICS) basados en servicios ecosistémicos**, de autoría de la estudiante **Brenda del Cisne Guazha Romero**, con **cédula de identidad No. 1150662730**, previa a la obtención del título de **Ingeniera Ambiental**. Una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Nacional de Loja, apruebo y autorizo su presentación para los trámites de titulación.



Firmado electrónicamente por:
CARLOS GUILLERMO
CHUNCHO MOROCHO

Ing. Carlos Guillermo Chunchu Morocho Mg.Sc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Brenda del Cisne Guazha Romero**, declaro ser autora del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales por el contenido de este. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi trabajo de integración curricular en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula: 1150662730

Fecha: 08/04/2025

Correo electrónico: brenda.guazha@unl.edu.ec

Celular: 0967970622

Carta de autorización por parte de la autora para la consulta de producción parcial o total, y publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.

Yo **Brenda del Cisne Guazha Romero**, declaro ser autora del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Evaluación de sistemas agroforestales de café en ecosistemas de la provincia de Loja a través de los Índices de calidad del suelo (ICS) basados en servicios ecosistémicos**, como requisito para optar por el título de **Ingeniera Ambiental**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja no se responsabiliza por el plagio o copia del trabajo de integración curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja al día ocho del mes de Abril del dos mil veinte y cinco.

Firma:



Autora: Brenda del Cisne Guazha Romero

Cédula: 1150662730

Dirección: Barrio Borja

Correo electrónico: brenda.guazha@unl.edu.ec

Celular: 0967970622

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Integración Curricular:

Ing. Carlos Guillermo Chunchu Morocho, Mg. Sc.

Dedicatoria

El presente trabajo de Integración Curricular lo dedico, en primer lugar, a Dios, por ser mi inspiración y darme la fuerza necesaria para continuar en este largo proceso y alcanzar una meta más en mi vida.

A mis padres, José Guazha y Sugedmira Romero, por ser el pilar fundamental en mi vida, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme que el sacrificio y la perseverancia son el camino hacia el éxito.

A mi querido Ángel Álvarez, por ser mi compañero, mi apoyo, mi refugio, y por estar a mi lado en cada momento, alentándome incluso cuando yo misma sentía que no podía continuar.

A mis adoradas mascotas, Maximiliano y Stormy, por acompañarme en las largas noches de desvelo y estar para mis en mis días tristes y felices, y a todos aquellos que han sido incondicionales en mi vida, por brindarme su amor, paciencia, confianza y por formarme con auténticos valores que me han guiado a ser una mejor persona.

Brenda del Cisne Guazha Romero

Agradecimiento

Quiero agradecer, en primer lugar, a Dios, por guiarme, fortalecerme y darme sabiduría a lo largo de este proceso.

A mis queridos padres, José Guazha y Sugedmira Romero, y a mis hermanos, por su amor, apoyo incondicional y por ser el motor que me impulsó a alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

A mi novio, Ángel Álvarez, por estar siempre a mi lado, por su amor incondicional, por ser mi lugar seguro en los momentos difíciles y compartir conmigo cada alegría y cada desafío. Gracias por tu paciencia, comprensión y por creer en mí incluso cuando yo dudaba, mi querido Angel cada uno de mis logros también son tuyos.

Extiendo mi gratitud a la planta docente de la Carrera de Ingeniería Ambiental, por su dedicación, compromiso y enseñanza constante durante mi formación profesional. De manera muy especial, agradezco al Ing. Carlos Chuncho Morocho, director de este Trabajo de Integración Curricular, por su apoyo personal y académico desde el inicio, por su guía oportuna y por confiar en mis capacidades durante el desarrollo de este trabajo.

Brenda del Cisne Guazha Romero

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas	x
Índices de Anexos	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	7
4.1 Importancia y calidad del suelo	7
4.2 Causas de la degradación del suelo.....	8
4.3 Consecuencias de la degradación del suelo	9
4.4 Servicios ecosistémicos del suelo	10
4.5 Propiedades del suelo.....	10
4.5.1 Propiedades físicas	10
4.5.2 Propiedades químicas.....	11
4.6 Sistemas agroforestales de café y sus beneficios	12
4.7 Calidad del suelo en Sistemas Agroforestales de Café.....	12
4.7.1 Condiciones que deben cumplir los indicadores de la calidad del suelo	13
4.7.2 Indicadores físicos.....	13
4.7.3 Indicadores químicos.....	14
5. Metodología	15
5.1 Área de estudio	15
5.2 Selección de los sistemas agroforestales	16
5.3 Muestras del suelo	17
5.4 Análisis de suelos.....	17

5.5 Selección y desarrollo de índices de calidad del suelo (ICS)	18
5.5.1 Identificación de un conjunto mínimo de datos (CMD) a partir de un conjunto total de datos (CTD).....	19
5.5.2. Normalización de los Indicadores	20
5.5.3. Integración de las puntuaciones de los indicadores en un ICS	22
6. Resultados	23
6.1 Objetivo 1: Seleccionar indicadores de calidad de suelo basados en los servicios ecosistémicos que proveen los suelos de los sistemas agroforestales de café en la provincia de Loja (Espíndola, Quilanga, Gonzanamá).....	23
6.1.1 Conjunto total de datos (CTD).....	23
6.2 Objetivo 2: Determinar el índice de calidad del suelo (ICS) mediante la integración de propiedades físicas y químicas en los sistemas agroforestales de café en la provincia de Loja (Espíndola, Quilanga, Gonzanamá).....	29
6.2.1 Conjunto mínimo de datos (CMD).....	29
6.2.2 Transformación de los indicadores	36
6.2.3 Índices de calidad del suelo.....	39
7. Discusión	42
8. Conclusiones	48
9. Recomendaciones	49
10. Bibliografía.....	50
11. Anexos.....	58

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación Geográfica del Área de estudio	16
Figura 2. Esquema de clasificación de los indicadores del suelo.....	21
Figura 3. Resultado del análisis bibliométrico, en donde se muestra la frecuencia en que las palabras clave fueron citadas en los diferentes artículos científicos a través de un Treemap	24
Figura 4. El Co-occurrence Network, muestra relaciones entre nodos	25
Figura 5. Nodos temáticos.....	26
Figura 7. Gráfico de sedimentación del cantón Espíndola para determinar el número de componentes principales a utilizar en el APC	31
Figura 8. Gráfico de sedimentación del cantón Quilanga para determinar el número de componentes principales a utilizar en el APC	33
Figura 9. Gráfico de sedimentación del cantón Gonzanamá para determinar el número de componentes principales a utilizar en el APC	35
Figura 10. Índice de Calidad del Suelo donde: A: ICS del cantón Espíndola; B: ICS del cantón Quilanga; C: ICS del cantón Gonzanamá y D: ICS para el promedio de los tres cantones estudiados de la provincia de Loja	41

Índice de tablas

Tabla 1. Indicadores físicos para la calidad del suelo	14
Tabla 2. Indicadores químicos para la calidad del suelo	15
Tabla 3. Método de laboratorio para determinar el valor de los indicadores del conjunto mínimo de datos (CMD).....	18
Tabla 4. Clasificación de la calidad del suelo.....	23
Tabla 5. Conjunto total de datos (CTD) para el desarrollo del ICS de sistemas agroforestales de café en el cantón Espíndola, Quilanga y Gonzanamá.....	27
Tabla 6. Componentes principales y similitudes para el modelo de seis componentes principales basado en los indicadores del CMD para el promedio de los tres cantones en estudio.....	30
Tabla 7. Componentes y similitudes para el modelo de cinco componentes principales basado en los indicadores del CMD del cantón Espíndola.....	32
Tabla 8. Componentes y similitudes para el modelo de cuatro componentes principales basado en los indicadores del CMD del cantón Quilanga	34
Tabla 9. Componentes y similitudes para el modelo de cuatro componentes principales basado en los indicadores del CMD del cantón Gonzanamá.....	36
Tabla 10. Curvas de normalización de indicadores del CMD	38
Tabla 11. Resumen del ICS para las zonas de estudio	41

Índices de Anexos

Anexo 1. Resultados del análisis de laboratorio.....	58
Anexo 2. Gráficas de indicadores Normalizados	60
Anexo 3. Certificado de traducción del abstract	66

1. Título

Evaluación de sistemas agroforestales de café en ecosistemas de la provincia de Loja a través de los Índices de calidad del suelo (ICS) basados en servicios ecosistémicos

2. Resumen

La calidad del suelo en sistemas agroforestales (SAF) de café en Quilanga, Espíndola y Gonzanamá, provincia de Loja, está afectada por plantaciones senescentes, manejo ineficiente, variabilidad de suelo y suelos marginales, lo que reduce la productividad y la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos (SE). La falta de un índice estandarizado dificulta su monitoreo y gestión, es crucial mejorar la calidad del suelo y optimizar la producción de café, por ello se desarrolló un índice de calidad del suelo (ICS) basado en servicios ecosistémicos, integrando propiedades físicas y químicas que permita su evaluación, facilitando la toma de decisiones para un manejo sostenible. Se utilizó un estudio bibliométrico para identificar los indicadores que se relacionan con las funciones del suelo y los SE en SAF de café. Se consideraron 20 indicadores como un conjunto total de datos (CTD) entre físicos-químicos como resultado del análisis bibliométrico. Además, se realizó un gráfico de sedimentación y un análisis de componentes principales, para seleccionar aquellos indicadores que tengan mayor correlación y formar un conjunto mínimo de datos (CMD) a partir del CTD, integrado por 15 indicadores para Gonzanamá, 11 Quilanga y 8 Espíndola. Finalmente, se procedió a normalizarlos e integrarlos en un ICS a través de ecuaciones matemáticas. Los resultados muestran que los indicadores que contribuyeron con mayor peso para el ICS fueron; MO, CO, N para el cantón Espíndola y Quilanga, mientras para Gonzanamá fue B, MO, CO y CE. El ICS para Gonzanamá presentó una calidad moderada (0,40), Espíndola (0,22) y Quilanga (0,18) mostraron baja y muy baja calidad, respectivamente. La calidad promedio del suelo en estas zonas es baja. Los indicadores fundamentales, como la MO, el CO y el N, deben priorizarse para mejorar la producción de café y preservar los servicios ecosistémicos esenciales.

Palabras clave: Indicadores de calidad del suelo, Propiedades físicas del suelo, Propiedades químicas del suelo, Servicios ecosistémicos del suelo, Sistema agroforestal de café.

Abstract

Soil quality in coffee agroforestry systems (AFS) in Quilanga, Espíndola and Gonzanamá, Loja province, is affected by senescent plantations, inefficient management, soil variability and marginal soils, which reduces productivity and the capacity to provide ecosystem services (ES). The lack of a standardized index makes monitoring and management difficult. It is crucial to improve soil quality and optimize coffee production; therefore, a soil quality index (SQI) was developed based on ecosystem services, integrating physical and chemical properties that allow its evaluation, facilitating decision making for sustainable management. A bibliometric study was used to identify indicators that relate to soil functions and ES in coffee FFS. Twenty indicators were considered as a total data set (CTD) between physical-chemical as a result of the bibliometric analysis. In addition, a sedimentation plot and a principal component analysis were performed to select those indicators with the highest correlation and form a minimum data set (MDC) from the CTD, composed of 15 indicators for Gonzanamá, 11 for Quilanga and 8 for Espíndola. Finally, they were normalized and integrated into an ICS through mathematical equations. The results show that the indicators that contributed the most weight to the ICS were: MO, CO, N for Espindola and Quilanga canton, while for Gonzanamá it was B, MO, CO and CE. The ICS for Gonzanamá showed moderate quality (0.40), Espíndola (0.22) and Quilanga (0.18) showed low and very low quality, respectively. The average soil quality in these areas is low. Key indicators, such as OM, CO and N, should be prioritized to improve coffee production and preserve essential ecosystem services.

Key words: Soil quality indicators, Soil physical properties, Soil chemical properties, Soil ecosystem services, Coffee agroforestry system.

3. Introducción

El suelo constituye un sistema natural tridimensional que se encuentra en la interfaz entre la atmósfera y la litosfera, caracterizado por la interacción dinámica de sus fases sólida, líquida y gaseosa, se relacionan en diferentes escalas y generan una amplia gama de beneficios y servicios ecosistémicos (Lal, 2016). Este medio edáfico cumple funciones esenciales en los ciclos biogeoquímicos, facilitando procesos fundamentales como la descomposición y reciclaje de materia orgánica, la retención de nutrientes, la eliminación de contaminantes, la purificación del agua, captura y el almacenamiento de carbono (C), contribuyendo a la regularización del clima. Además, favorece la conservación del material genético vegetal y proporciona hábitats fundamentales para la biodiversidad (Bengal et al., 2007).

El concepto de calidad del suelo, según Karlen (2004), integra atributos, físicos, químicos y biológicos que determinan su funcionalidad. Según, Jamal et al. (2023) esta calidad se relaciona con la capacidad del suelo para desempeñar funciones en condiciones naturales o en ecosistemas modificados por el ser humano. No obstante, Schroth et al. (2009), destacan la complejidad de la calidad del suelo en comparación con la del aire y del agua, debido a diversidad de sus fases físicas, que determinan tanto su estado actual como su potencial para satisfacer demandas futuras.

A pesar de su importancia el suelo, no ha recibido la atención necesaria, y su calidad se ha visto afectada negativamente en los últimos años, debido a prácticas de gestión inadecuada y al impacto de la agricultura convencional y sistemas de gestión deficientes (Bone et al., 2010). Esta degradación del suelo reduce su estabilidad y capacidad para ofrecer servicios ecosistémicos esenciales (Joimel et al., 2017). En respuesta a estos desafíos, han surgido modelos agroecológicos orientados a la sostenibilidad, entre los que destacan los sistemas agroforestales (SAF). Estos sistemas integran árboles y arbustos perennes con cultivos o ganado, con el objetivo de diversificar la producción, optimizar el uso del suelo y mejorar su calidad. Los SAF de café son uno de los modelos más representativos en este contexto (Viteri, 2013; Moreira y Castro, 2017). En Ecuador, los SAF de café se encuentran distribuidos en las regiones costa, sierra, oriente y región insular. En estas zonas se produce principalmente café Arábigo, que representa el 62 % de la producción total, seguido del café

Robusta con el, 38 % (MAGAP, 2018; Ortega, 2003). Estos sistemas ofrecen numerosos servicios ecosistémicos como el reciclaje de nutrientes, la infiltración y almacenamiento de agua, la generación de biomasa y materia orgánica (Benavides, 2013; Rodríguez et al., 2021). Así mismo, desempeñan un papel relevante en la mitigación y adaptación al cambio climático mediante la captura de carbono en la biomasa aérea, favorecen a los procesos de polinización, reducen la erosión del suelo y actúan como control biológico de plagas y enfermedades (Pinoargote, 2022). Además, desempeñan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad, al limitar la expansión de la frontera agrícola y ganadera; y al mismo tiempo conservan la diversidad de microorganismos del suelo (Schroth et al., 2004).

En la provincia de Loja, se han impulsado diversas iniciativas sostenibles para la producción de café en sistemas agroforestales (SAF), con el objetivo de recuperar ecosistemas degradados, mitigar la erosión del suelo y promover su conservación (Sánchez, 2021). Sin embargo, la rentabilidad del café en esta provincia enfrenta limitaciones debido a factores el envejecimiento de los cafetales, el manejo inadecuado del cultivo, la siembra en áreas con baja aptitud edafoclimática y la variabilidad de parámetros meteorológicos como la precipitación y temperatura (Sepúlveda y Carrillo, 2015). Además, la contaminación del suelo se ha identificado como un factor crítico que afecta tanto a la calidad como la producción del café (Gong et al., 2023).

Evaluar la calidad del suelo en sistemas agroforestales (SAF) de café en la provincia de Loja es de vital importancia por el impacto que tiene en la productividad agrícola, la sostenibilidad del sistema y conservación del ambiente. Al tener una comprensión adecuada de la calidad del suelo permite a los agricultores implementar prácticas de manejo adecuadas y tomar decisiones informadas para optimizar la producción de café, reducir la degradación del suelo y promover la conservación de la biodiversidad, (Sánchez y Torres 2018). En este sentido (Cerdeira et al., 2020) resaltan la importancia de la relación entre la calidad del suelo y su relación con los servicios ecosistémicos, mientras que Kremen y Miles (2012) señalan que a medida que aumentan los rendimientos de producción, también aumentan los servicios ecosistémicos proporcionados.

Una de las principales limitaciones en la evaluación de la calidad del suelo radica en su alta variabilidad espacial y en la especificidad de sus propiedades en función del tipo de

suelo y del contexto ecológico (Singh et al. 2014). No obstante, esta evaluación se puede realizar mediante el uso de indicadores los cuales están compuestos por propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Estos indicadores deben seleccionarse cuidadosamente y agruparse en un conjunto mínimo de datos, que posteriormente se transforman en un índice general, conocido es posible realizar esta evaluación mediante el uso de indicadores. Estos indicadores compuestos por propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo deben ser seleccionados cuidadosamente y agrupados en un conjunto mínimo de datos, para luego ser transformados en un índice general, conocido Índice de Calidad del Suelo (ICS) (Rezaee et al., 2020). El ICS proporciona una medida que informa sobre la aptitud del suelo para desempeñar una o más funciones específicas (Chuncho y Arrellano, 2018). De este modo, el ICS se convierte en una herramienta útil para evaluar y comparar la calidad del suelo en diferentes áreas, facilitando la toma de decisiones sobre prácticas de manejo y acciones de conservación del suelo (Drobnik et al., 2018).

En este contexto, surge la necesidad de evaluar la calidad del suelo en los SAF de café en la provincia de Loja, y determinar los servicios ecosistémicos que estos sistemas pueden brindar, por esta razón se ha planteado la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué indicadores basados en servicios ecosistémicos permiten evaluar y representar la calidad del suelo en los sistemas agroforestales de café en la provincia de Loja (Espíndola, Quilanga, Gonzanamá)?

La presente investigación tiene por objetivo general, evaluar la calidad del suelo en los sistemas agroforestales de café a través del índice de calidad del suelo (ICS) basado en servicios ecosistémicos, en la provincia de Loja (Espíndola, Quilanga, Gonzanamá). Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos; i) Seleccionar indicadores de calidad de suelo basados en los servicios ecosistémicos que proveen los suelos de los sistemas agroforestales de café en la provincia de Loja (Espíndola, Quilanga, Gonzanamá), ii) Determinar el índice de calidad del suelo (ICS) mediante la integración de propiedades físicas y químicas en los sistemas agroforestales de café en la provincia de Loja (Espíndola, Quilanga, Gonzanamá).

4. Marco teórico

4.1 Importancia y calidad del suelo

Velásquez, (2003) menciona que el suelo representa un recurso natural finito y no renovable, que cumple diversas funciones ambientales o servicios ecosistémicos. Uno de estos servicios es su contribución en los ciclos biogeoquímicos de elementos vitales para la vida, como carbono, nitrógeno, fósforo, etc., que continuamente y por efecto de la energía disponible, pasan de los sistemas vivos a los componentes no vivos del planeta. Además, el suelo es reconocido principalmente como el soporte natural para la producción de alimentos y materias primas, los cuales son fundamentales para la subsistencia y desarrollo de la sociedad global. Es importante tener en cuenta que el suelo, siendo un recurso limitado, requiere una gestión adecuada y sostenible para garantizar su disponibilidad a largo plazo y preservar los servicios ambientales que proporciona.

El suelo tiene una influencia significativa en el entorno en el que se encuentra y afecta directamente las actividades sociales y económicas de las comunidades humanas que se establecen en determinadas áreas. Estas comunidades ejercen distintos niveles de presión sobre el suelo, lo que puede resultar en su afectación o deterioro. A lo largo de la historia, el suelo ha sido un elemento fundamental en la vida de los seres humanos. Sin embargo, a menudo se le ha dado menos atención en comparación con otros recursos naturales, según (Orjuela Hernán Burbano, 2016). Esto puede ser atribuido a que el suelo es menos visible y su importancia puede pasar desapercibida en relación con otros aspectos del entorno natural. Sin embargo, es esencial reconocer la relevancia del suelo como un recurso natural clave y su degradación o pérdida puede tener graves consecuencias para la sociedad, incluyendo la disminución de la productividad agrícola, la pérdida de biodiversidad y la degradación del agua y los ecosistemas (Hernán y Orjuela, 2010). Por eso, hoy es fundamental promover una gestión responsable y sostenible del suelo, así como aumentar la conciencia sobre su importancia para garantizar su conservación a largo plazo y su capacidad para satisfacer las necesidades presentes y futuras de las sociedades humanas.

Andrews et al., (2002) menciona que cuando se habla de la calidad del suelo se considera uno de los tres elementos que conforman la calidad ambiental, junto con la calidad del agua y del aire. La calidad del suelo no se restringe únicamente al nivel de contaminación

del suelo; más bien, se define de una manera mucho más amplia como "la capacidad de un suelo para operar dentro de los límites del ecosistema y del uso de la tierra, con el propósito de mantener la productividad biológica, conservar la calidad ambiental, fomentar el crecimiento de plantas y la salud de los animales" (Bünemann et al., 2018).

La calidad del suelo es un parámetro que no es directamente cuantificable; sin embargo, es fundamental contar con variables que son medidas e integradas para evaluar su calidad. Estas variables se convierten en indicadores, ya que representan una condición e involucran información sobre los cambios o tendencias que sufre con el tiempo el suelo (Dumanski et al., 1998). Además, son considerados como una herramienta de medición que ofrece información sobre las propiedades, los procesos y las características del suelo y estos se miden para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un período de tiempo determinado (García et al., 2012).

4.2 Causas de la degradación del suelo

El suelo, al ser un recurso natural tiene diferentes usos al cual puede ser sometido, además también tiene funciones ecológicas y muchas de éstas se basan en actividades socioeconómicas y su degradación se explica por los monocultivos, productos químicos que no son manejados adecuadamente, industrias, entre otras, generando riesgo para la calidad ambiental (López, 2002).

La calidad del suelo es susceptible a ser alterada principalmente por dos grandes categorías de degradación. La primera se relaciona con el desplazamiento del material del suelo, donde se incluyen la erosión hídrica y eólica, según lo mencionado por Schröder et al. (2016). La segunda categoría se refiere a la degradación originada por un deterioro interno. Dentro de esta categoría, encontramos la degradación química, que abarca la pérdida de nutrientes, la contaminación, la acidificación y la salinización. También se encuentra la degradación física, que involucra la compactación y el deterioro de la estructura del suelo, y la degradación biológica, como señalan Schindelbeck et al. (2008). Esta última es resultado de un desequilibrio en la actividad biológica en el suelo, que implica la pérdida del banco de semillas y microorganismos relevantes en procesos de fertilidad y descontaminación, según Cotler et al. (2007).

4.3 Consecuencias de la degradación del suelo

Rojas y Ibarra, (2003) en su estudio realizado en Paraguay denominado “La degradación del suelo y sus efectos sobre la población” mencionan que la degradación de la calidad del suelo se manifiesta a través de la pérdida de nutrientes, cambios en las propiedades fisicoquímicas, deterioro estructural, menor capacidad de retención de agua, pérdida de materiales, aumento de la presencia de tóxicos y una consecuencia inmediata de esta pérdida de suelos fértiles es el aumento en el precio de los alimentos, lo que puede provocar escasez alimentaria y un impacto negativo en la salud y el bienestar de la población.

Pascal, (1999) en su investigación “Los suelos de las altas tierras andinas: los páramos del Ecuador”, señalan que una consecuencia de la degradación del suelo es la desaparición de la cobertura vegetal, alterando el papel regulador de los flujos hídricos del páramo y formando costras. Pachés, (2015) en su indagación “Degradación de suelos” realizada en España, menciona que, a largo plazo, la degradación del suelo conduce a la desertificación, un proceso definido como la pérdida de la productividad de los suelos en áreas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultado de diversos factores como variaciones climáticas y actividades humanas. La desertificación surge de una combinación de factores sociales, políticos, económicos y naturales que varían según la ubicación y evolucionan con el tiempo. Estos incluyen factores directos como la distribución de usos del suelo, prácticas de explotación y procesos climáticos, así como factores indirectos como la presión demográfica, aspectos socioeconómicos y políticos, y el comercio internacional. La desertificación es un proceso autoperpetuante que genera inestabilidad económica y política en los países afectados. Por lo tanto, las consecuencias de la desertificación son sumamente graves, y combatirla representa uno de los desafíos a los que deben enfrentarse la humanidad.

Un estudio realizado por Blackmore et al. (2021) en Ecuador mencionan que una de las consecuencias de la degradación del suelo es la disminución de la producción agrícola y la crisis económica que ha impactado negativamente la salud de la población y sus resultados sugieren la necesidad de una intervención que aborde de manera sostenible los desafíos de producción.

4.4 Servicios ecosistémicos del suelo

En opinión a varios autores (Cram et al., 2008; Burbano Orjuela, 2016; Pinoargote, 2022; Javier et al., 2014) quienes señalan que el suelo provee algunos servicios ecosistémicos, como; Producción de alimentos y biomasa, del suelo se obtiene más del 95 % de la producción mundial de alimentos, ya que suministra los nutrientes necesarios para producir alimentos y biomasa en general, además es un escenario indispensable para los ciclos biogeoquímicos que ocurren en la naturaleza y que son indispensables para que exista condiciones equilibradas en la tierra, los cual involucran elementos como carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, entre otros. También almacena o fija el carbono, con la intervención de las plantas y la participación de los organismos del suelo, el carbono se transforma en materia orgánica que se acumula en el suelo por amplios periodos de tiempo impidiendo que el CO₂ vaya a la atmósfera y así contribuye a la reducción de los gases de efecto invernadero que propician el cambio climático,

En el almacenamiento y filtración de agua desempeña un papel fundamental porque ayuda en el ciclo hidrológico al captar, infiltrar y almacenar el agua. Este proceso es necesario para la recarga de los acuíferos, ya que el suelo actúa como un reservorio natural. Es considerado como una de las reservas más importantes de biodiversidad, donde encontramos una gran diversidad de organismos que viven en su superficie y al interior del suelo. Entorno físico y cultural para la humanidad que sirve de base para las actividades humanas, es un elemento del paisaje y del patrimonio cultural. Por lo que adquiere la categoría de “bien social” que por lo mismo amerita su conocimiento por parte de la sociedad mundial para que lo valore, lo proteja y lo conserve, como una obligación que resulta ser en los actuales momentos un imperativo ético.

4.5 Propiedades del suelo

4.5.1 Propiedades físicas

Rucks et al. (2004) determinan que estas propiedades determinan en gran medida la capacidad de muchos de los usos del suelo que el hombre les pueda dar, aquí tenemos la: textura que se refiere al tamaño de las partículas del suelo, y pueden clasificarse en arena, limo y arcilla. En estudios realizados por Brady y Weil, (2008) mencionan que la textura del

suelo influye en su capacidad para retener agua, así como en su drenaje y aireación. Además, menciona que la porosidad del suelo es un factor crucial que afecta la capacidad de almacenamiento y movimiento del agua en el suelo, debido a que los poros en el suelo ayudan en la absorción del agua, la retención de la humedad disponible para las plantas y la distribución de los nutrientes en el suelo. También hace referencia que la permeabilidad del suelo es una propiedad crítica que determina la capacidad del suelo que permite el flujo de agua y, por ende, afecta la infiltración del agua, el drenaje y la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas.

En estudios realizados por Rawls et al. (2003), mencionan que la capacidad de retención de agua en el suelo es la capacidad para retener agua después de que el exceso ha drenado. Además, define a la densidad del suelo como “la masa de suelo por unidad de volumen es una propiedad fundamental que afecta la estructura y la calidad del suelo”. Hillel, (2004) afirma que esta medida es importante para comprender la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo, lo que la hace capaz para sostener la vida vegetal.

4.5.2 Propiedades químicas

En estudios realizados por Pereira et al. (2011) mencionan que el pH del suelo es una medida de su acidez o alcalinidad y se expresa en una escala de 0 a 14, además menciona que es un factor importante, ya que afecta la disponibilidad de nutrientes para las plantas ya que algunos nutrientes se vuelven más o menos disponibles en función de la acidez o alcalinidad del suelo.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo se refiere a su capacidad para retener y liberar cationes, que son iones cargados positivamente como calcio, magnesio, potasio, entre otros. Una alta CIC indica que el suelo puede retener más nutrientes, lo cual es beneficioso para el crecimiento de las plantas. La CIC está influenciada por la cantidad y tipo de arcilla y materia orgánica presentes en el suelo.

La materia orgánica del suelo está compuesta por materiales vegetales y animales en descomposición, como hojas caídas, restos de plantas y estiércol. Su presencia mejora la estructura del suelo, aumenta su capacidad de retención de agua, mejora la actividad microbiológica y suministra nutrientes a las plantas. Un suelo con altos niveles de materia orgánica es beneficioso para la productividad y fertilidad del suelo.

En estudios realizados Zambrano Sarango, (2019) en sistemas agroforestales de café en la provincia de Loja, menciona que el suelo contiene una variedad de nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas como; nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, zinc y cobre. Además, menciona que algunos suelos pueden contener niveles elevados de metales pesados como plomo, mercurio, cadmio, entre otros, los cuales son tóxicos para las plantas y pueden contaminar los cultivos, representando un riesgo para la salud humana.

4.6 Sistemas agroforestales de café y sus beneficios

Los sistemas agroforestales son modelos sostenibles que combinan árboles, cultivos y a veces ganado en un mismo espacio, favoreciendo la biodiversidad y la salud del suelo. Están compuestos por especies leñosas, cultivos agrícolas y ganado, promoviendo la conservación del agua, la captura de carbono y una producción más sostenible (Schroth et al., 2004). Según Somarriba et al. (2018) los sistemas agroforestales de café son enfoques sostenibles para su cultivo que combinan la producción de café con la conservación de servicios ecosistémicos y la protección del suelo, algunos beneficios de los SAF de café para el suelo son; aporte de materia orgánica debido a que los residuos vegetales provenientes de los árboles y arbustos en los sistemas agroforestales aportan materia orgánica al suelo, mejorando su estructura y fertilidad (Rice et al., 2016; Amezquita et al., 2019), ciclo de nutrientes: la diversidad de especies vegetales en los sistemas agroforestales promueve la ciclización de nutrientes, reduciendo la necesidad de fertilizantes externos (Rapidel et al., 2006). Además, controlan la erosión y la pérdida de nutrientes por la presencia de cobertura vegetal (Gockowski y Sonwa, 2011; Somarriba et al., 2004).

Regulan el microclima por la sombra que proporcionan los árboles, ayudando a mantener una temperatura adecuada y reduciendo el estrés hídrico en las plantas de café (Perfecto et al., 2005; Astier et al., 2006). Los sistemas agroforestales de café promueven la diversidad de especies vegetales y animales, lo que contribuye a la conservación de la biodiversidad (Moguel y Toledo, 2018) y son muy resilientes al cambio climático, ya que actúan como sumideros de carbono y mejoran la adaptabilidad de los cultivos al estrés climático.

4.7 Calidad del suelo en Sistemas Agroforestales de Café

Correia et al. (2020) mencionan que los sistemas agroforestales (SAF) representan una opción de cultivo que incorpora un componente forestal. Estos sistemas combinados ofrecen una alternativa de manejo del suelo que busca garantizar la sostenibilidad a través de la eficiencia y la optimización de los recursos naturales en la producción. Para Noponen et al. (2013), los sistemas agroforestales (SAF) representan una alternativa eficiente para preservar la biodiversidad y reducir la degradación ambiental.

Se han llevado a cabo varios estudios sobre diferentes aspectos relacionados con la calidad del suelo en SAF de café (Tumwebaze y Byakagaba, 2016; Wagg et al., 2019), como capacidad de brindar soporte físico, retener y suministrar nutrientes a las plantas, mantener la fertilidad y regular los ciclos de elementos importantes. Dichas funciones se pueden describir utilizando indicadores medibles de calidad del suelo que abarquen características físicas, químicas y biológicas. Estos indicadores proporcionan una evaluación más precisa de la calidad del suelo en comparación con parámetros individuales. Además, se han realizado diversos intentos para determinar los indicadores de calidad del suelo utilizando diferentes métodos, como el enfoque del índice de calidad del suelo aditivo simple, el enfoque del índice de calidad del suelo aditivo ponderado y modelos estadísticos (Leul et al., 2023).

4.7.1 Condiciones que deben cumplir los indicadores de la calidad del suelo

Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de calidad deben cubrir algunas condiciones según Cruz et al. (2004). Como describir los procesos del ecosistema, integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir, además de ser sensitivas a variaciones de clima y manejo, ser accesibles a muchos usuarios, además de ser aplicables a condiciones de campo que sean reproducibles y fáciles de entender y finalmente ser sensitivos a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica.

4.7.2 Indicadores físicos

Las características físicas del suelo pueden utilizarse como indicadores de calidad del suelo, ya que reflejan cómo este recurso interactúa con el agua, su capacidad de retención y transmisión hacia las plantas, así como las limitaciones que pueden afectar el crecimiento

del sistema radicular, germinación de las semillas y la penetración o el flujo del agua dentro de las plantas, además están asociadas con la estructura de las partículas y los espacios porosos.

Tabla 1. *Indicadores físicos para la calidad del suelo*

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación
Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo.	% de arena, limo y arcilla; pérdida del sitio o posición del paisaje.
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces.	Estima la productividad potencial y erosión.	cm o m.
Infiltración y densidad aparente.	Potencial de lavado; productividad y erosividad.	Minutos / 2.5 cm de agua y g/cm ³ .
Capacidad de retención del agua.	Relación con la retención de agua, transporte, y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica.	% (cm ³³ /cm ³), cm de humedad aprovechable/ 30cm; intensidad de precipitación.

Nota. Tomado de La Calidad del Suelo y sus Indicadores (p.94). por Cruz et al, 2004.

4.7.3 *Indicadores químicos*

Las propiedades químicas del suelo pueden utilizarse como indicadores, debido a que algunas condiciones afectan directamente las relaciones suelo planta, calidad del agua, capacidad amortiguadora del suelo, disponibilidad de agua y nutrientes.

Tabla 2. *Indicadores químicos para la calidad del suelo*

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación
Materia orgánica (N y C total)	Define la fertilidad del suelo; estabilidad; erosión.	kg de C o Na ha-1.
pH	Define la actividad química y biológica.	Comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana.
Conductividad eléctrica.	Define la actividad vegetal y microbiana.	dSm-1; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana.
P, N y K extractables	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de la calidad ambiental.	kg ha-1; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos.

Nota. Tomado de La Calidad del Suelo y sus Indicadores (p.94). por Cruz et al, 2004.

5. Metodología

5.1 Área de estudio

La investigación se desarrolló en la provincia de Loja, en los cantones Espíndola, Quilanga y Gonzanamá, comparten algunas características como una fuerte tradición cafetera en zonas de altitud media-alta (entre 1,200 y 2,100 m s. n. m.), un clima subtropical húmedo y templado, que influye en los nutrientes del suelo, ecosistemas agrícolas mixtos que combinan el cultivo de café con otros cultivos y bosques secundarios, suelos ricos en materia orgánica pero vulnerables a la erosión, y la presión antropogénica asociada a la expansión agrícola, lo que impacta la calidad del suelo y los servicios ecosistémicos (Tapia, 2016) (Figura 1).

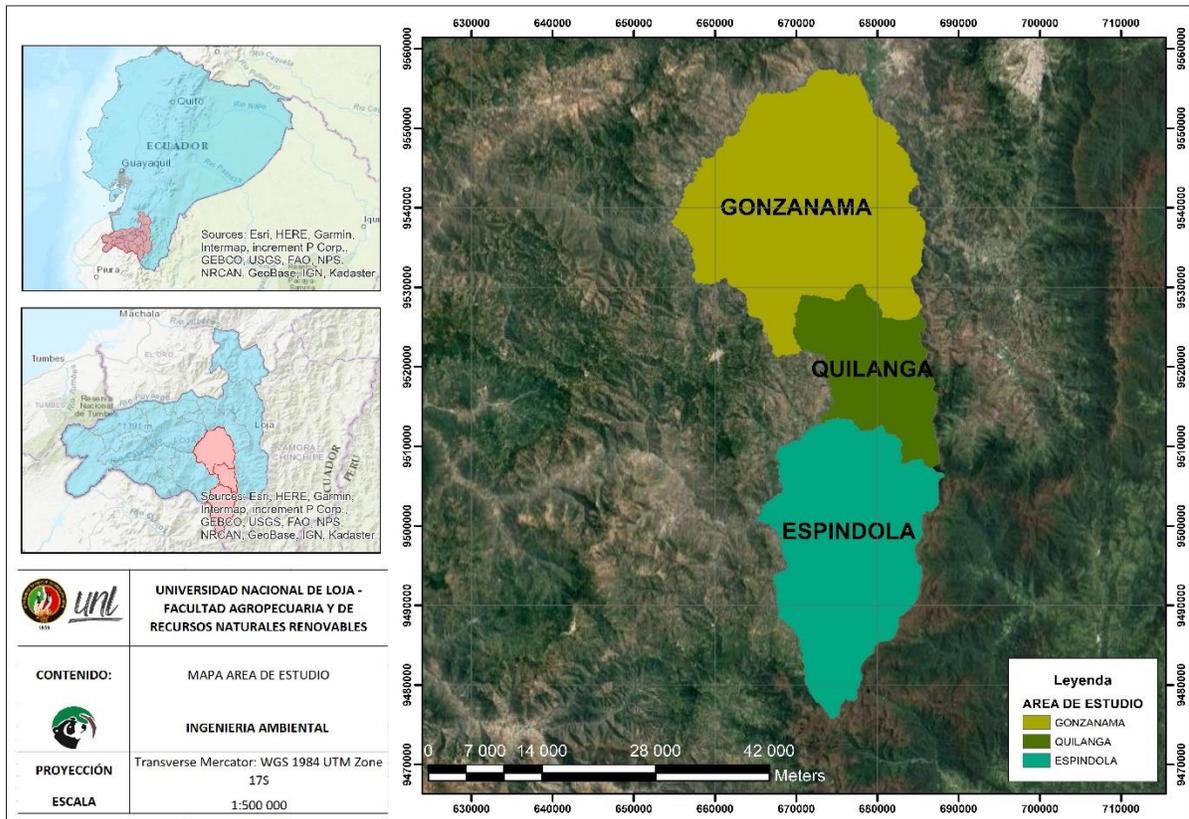


Figura 1. *Ubicación Geográfica del Área de estudio*

5.2 Selección de los sistemas agroforestales

El levantamiento de la información se realizó en sistemas agroforestales de café en ecosistemas de la provincia de Loja, cantones Espíndola, Quilanga y Gonzanamá, como parte del proyecto “Biogeografía del cambio climático en el Sur del Ecuador: Dinámicas de cambio de uso de suelo y su influencia en la distribución espacial y temporal de especies nativas”.

Estas áreas fueron seleccionadas por su representatividad en términos de calidad del café y variables edafológicas, topográficas, condiciones climáticas (precipitación, temperatura), altitud y su interacción con factores tanto naturales como antropogénicos que influyen en las características físicas y químicas del suelo, por ende en la calidad y productividad del café, (Córdova, 2021). Además, estas zonas se destacan por la presencia de especies perennes y capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos (regulación del microclima, retención de agua, reducción de la erosión y la función como hábitat de animales y plantas) (Pinoargote, 2022). Cada cantón tiene condiciones agroecológicas y

socioeconómicas únicas, por lo que se deben incluir SAF de café que reflejen la diversidad geográfica y ecológica de la región.

5.3 Muestras del suelo

Se realizó un muestreo aleatorio, en el que se tomaron 30 muestras en total. Las muestras de suelo se distribuyeron en parcelas dentro de los tres cantones de estudio, se hizo un muestreo en zigzag, este método consistió en seguir líneas cruzadas, caminando aproximadamente 25 pasos desde cada punto seleccionado, y recolectando 20 submuestras de suelo para formar una muestra compuesta por parcela. La recolección del suelo se realizó a una distancia de entre 0.50 y 0.70 m de las plantas de café, limpiando la superficie y excavando un hoyo con ayuda de un barreno hasta una profundidad de 20 cm para extraer 1 kg de submuestra de suelo y conformar la muestra compuesta (Mendoza y Espinoza, 2017).

Las muestras recolectadas fueron transportadas en fundas herméticas, etiquetadas y posteriormente transferidas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Santa Catalina, en Quito.

5.4 Análisis de suelos

Previo al análisis de suelo en laboratorio (Tabla 3), se realizó un análisis bibliométrico (Tabla 5) que conforman 20 variables el conjunto total de datos y que están relacionadas principalmente con los servicios ecosistémicos y las funciones del suelo. Estas variables fueron analizadas en cada una de las 30 muestras de suelo transferidas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Santa Catalina, en Quito, donde se llevó a cabo su evaluación.

Tabla 3. Método de laboratorio para determinar el valor de los indicadores del conjunto mínimo de datos (CMD)

Variable	Método utilizado
Variables Químicas	
pH	Técnica de electrometría
MO (%)	Dicromato de potasio
N (%)	Técnica volumétrica
Mg (cmol/kg)	Olsen modificado
Mn (mg/kg)	Olsen modificado
Cu (mg/kg)	Olsen modificado
Zn (mg/kg)	Olsen modificado
K (cmol/kg)	Olsen modificado
S (cmol/kg)	Olsen modificado
B (cmol/kg)	Olsen modificado
Ca/Mg (cmol/kg)	Olsen modificado
Mg/k (cmol/kg)	Olsen modificado
Ca+/Mg/K (cmol/kg)	Olsen modificado
CO (mol/kg)	Pasta saturada
Na ⁺ (cmol/kg)	Olsen modificado
K ⁺ (cmol/kg)	Olsen modificado
Ca ²⁺ (cmol/kg)	Olsen modificado
EC (cmol/kg)	Pasta saturada
Variables Físicas	
Limo (%)	Hidrómetro Bouyoucos
Arcilla (%)	Hidrómetro Bouyoucos

Nota. Variables utilizadas en el estudio y el método con el que se obtuvieron en laboratorio.

5.5 Selección y desarrollo de índices de calidad del suelo (ICS)

Se utilizó el enfoque propuesto por Andrews et al. (2002), Chuncho y Arrellano (2018) para el desarrollo del ICS. Este enfoque se basa en tres aspectos fundamentales.

- a) Identificación de un conjunto mínimo de datos (CMD) a partir de un conjunto total de datos (CTD).

- b) Normalización de los indicadores del CMD
- c) Integración de las puntuaciones de los indicadores del CMD en un ICS.

5.5.1 Identificación de un conjunto mínimo de datos (CMD) a partir de un conjunto total de datos (CTD).

Antes de analizar el ICS en sistemas agroforestales de café y su relación con los servicios ecosistémicos en los cantones Espíndola, Quilanga y Gonzanamá, se llevó a cabo una revisión bibliográfica. Para ello, se recopiló información de artículos científicos obtenidos de las bases de datos Web of Science y Scopus. Posteriormente, se realizó un estudio bibliométrico utilizando la librería "Bibliometrix" en el software R 3.6 con el objetivo de identificar la relación entre los servicios ecosistémicos y los indicadores de la calidad del suelo (Becerra, 2014).

El análisis bibliométrico se basó en referencias de publicaciones científicas indexadas desde 1970 hasta diciembre del 2023. A través de este estudio, se determinó qué propiedades fisicoquímicas del suelo presentan mayor asociación con los servicios ecosistémicos y la calidad del suelo. Para establecer la relación entre los SAF de café con los servicios ecosistémicos y la calidad del suelo, se emplearon palabras clave como: sistema agroforestal de café, agroforestería y café, indicadores de calidad del suelo, propiedades físicas del suelo, propiedades químicas del suelo y servicios ecosistémicos del suelo. Tras la búsqueda, se analizaron las revistas científicas que mayor número de publicaciones tienen sobre esos temas, identificando los indicadores más utilizados en la determinación del ICS.

La selección de los indicadores para evaluar la calidad del suelo en SAF de café en los cantones de estudio, se fundamentó en los resultados del análisis bibliométrico. Entre ellos, la materia orgánica (MO) fue identificada como un factor clave para su función en la retención y suministro de nutrientes para las plantas, además de su contribución a la regulación climática y al ciclo hidrológico. Así mismo, se identificaron los principales servicios ecosistémicos provistos por los SAF de café y se clasificaron en función de su relación con las funciones del suelo dentro de estos sistemas. A partir de esta clasificación, se estableció un conjunto de indicadores de calidad del suelo, incluyendo parámetros físicos y químicos relevantes para el estudio, de acuerdo con metodologías previamente documentadas (Hernández et al., (2016).

Para seleccionar los indicadores más representativos en la determinación del ICS, se aplicó un análisis de componentes principales (ACP), considerando todas las variables físicas y químicas. Posteriormente, se utilizó una matriz de correlación de Spearman con un umbral de significancia de 0,05, eliminando las variables redundantes identificadas en el resultado del ACP. Se seleccionaron únicamente los coeficientes de correlación ($r \geq 0,7$ o $r \leq -0,7$), descartando aquellos con valores menores a este umbral, siguiendo metodologías utilizadas en estudios previos (Javier et al., 2014; Barrezueta et al., 2017; León et al., 2020).

Además, se generó un gráfico de sedimentación (Scree Plot) para visualizar la importancia de cada componente principal y determinar el número óptimo de componentes principales a emplear en el análisis. Este proceso permitió identificar la cantidad de factores principales necesarios para explicar la variabilidad de los indicadores de calidad del suelo, y definir la estructura subyacente de los datos, como se señala en un estudio previo realizado por (Chuncho y Arrellano, 2018).

El ACP se empleó mediante la librería “psych” en el software R 3.6. las comunalidades ponderadas del conjunto mínimo de datos (CMD), normalizadas dividiendo por su suma. Estas comunalidades ponderadas se determinaron mediante la suma del cuadrado del producto entre cada carga factorial y la proporción ponderada correspondiente. Los resultados de este proceso permitieron obtener un conjunto optimizado de indicadores para la evaluación del ICS en SAF de café (Hernández et al., 2016).

5.5.2. Normalización de los Indicadores

La normalización de los indicadores del conjunto mínimo de datos se utilizó para transformar los valores medidos en laboratorio a valores estandarizados, en un rango de 0 a 1. Estas puntuaciones normalizadas se aplicaron para combinar los indicadores y formar un solo valor, conocido como Índice de Calidad del Suelo (ICS), siguiendo la metodología propuesta por Hyun et al. (2022). Para facilitar la combinación de los indicadores, se clasificaron en tres categorías diferentes:

- "Más es mejor" (curva sigmoidea asintótica superior) para indicadores con influencia positiva en la calidad del suelo a través de valores más altos.
- "Menos es mejor" (curva sigmoidea asintótica inferior) para indicadores con influencia negativo en la calidad del suelo a través de valores más altos.

- "Óptimo" (función gaussiana) para indicadores que en valores óptimos permiten el correcto desarrollo de las plantas.

La normalización y clasificación de los indicadores permitió obtener un único valor, el ICS reflejó de manera integral la calidad del suelo en los sistemas agroforestales de café, tomando en cuenta diferentes aspectos y relaciones entre los indicadores y las funciones del suelo, según Hernández et al. (2016).



Figura 2: Esquema de clasificación de los indicadores del suelo

Nota. Clasificación de los indicadores del suelo según la función del suelo

La clasificación “más es mejor” (Ec. 1) se utilizó para las propiedades que se relacionan con la fertilidad del suelo, la distribución del agua y la estabilidad estructural. Para la clasificación “menos es mejor” (Ec. 1) se la utilizo para indicadores que a valores altos tiene un efecto inhibitor sobre el crecimiento de las raíces de las plantas debido a su efecto sobre la porosidad del suelo (Andrews et al., 2002; Chunchu y Arrellano, 2018; Sinha et al., 2009; Zhang et al., 2011).

$$S_{NL} = \frac{a}{1 + \left(\frac{X}{X_0}\right)^b}$$

Ecuación 1: Ecuación para indicadores con la condición más es mejor (-2.5) y menos es mejor (2.5).

En la clasificación “óptimo” se utilizó la (Ec. 2) por Andrews et al. (2004) para indicadores que son necesarios en valores óptimo que permiten el correcto desarrollo de las plantas.

$$y_{ij} = \frac{1}{\left(1 + z_j(x_{ij} - a_j)^2\right)}$$

Ecuación 2: Ecuación para indicadores con la condición óptima.

Donde:

Y_{ij} : es el valor de cada observación i en el indicador j obtenido de la función de pertenencia.

X_{ij} : es el valor medido (campo/laboratorio) de cada i observación del indicador j .

a_j : es la observación mediana tomada para cada indicador j

z_j : es el valor máximo entre el indicador j valor

5.5.3. Integración de las puntuaciones de los indicadores en un ICS

Una vez obtenidas las puntuaciones normalizadas de los indicadores del CMD que intervienen en las funciones del suelo, se procedió a la integración en un índice estandarizado entre 0 y 1, para lo cual se hizo uso de la ecuación 3 (Chuncho y Arrellano, 2018).

$$ICS = \sum_{i=1}^n f(x) * S_j$$

Ecuación 3: Integración de indicadores.

Donde:

ICS= Valor del índice de calidad del suelo.

n = Número de indicadores que componen el CMD.

$f(x)$ = Puntuación de cada indicador.

S_j = Ponderación final asignada a cada indicador (ACP).

Con los resultados obtenidos de la integración de las puntuaciones se determinará la calidad del suelo en los sistemas agroforestales de café en el cantón Espíndola, Quilanga y Gonzanamá (Tabla 4).

Tabla 4. *Clasificación de la calidad del suelo*

Índice de Calidad de Suelos	Escala	Clases
Muy alta calidad	0.80 – 1.00	1
Alta calidad	0.60 – 0.79	2
Moderada calidad	0.40 – 0.59	3
Baja calidad	0.20 – 0.39	4
Muy baja calidad	0.00 – 0.19	5

Nota. Tomado de Understanding the effect of three decades of land use change on soil quality and biomass productivity in a Mediterranean landscape in Chile Hernández et al, 2016.

6. Resultados

6.1 Objetivo 1: Seleccionar indicadores de calidad de suelo basados en los servicios ecosistémicos que proveen los suelos de los sistemas agroforestales de café en la provincia de Loja (Espíndola, Quilanga, Gonzanamá).

6.1.1 Conjunto total de datos (CTD)

Se identificaron 3654 artículos científicos utilizando las palabras clave: “sistema agroforestal de café”, “indicadores de calidad del suelo”, “propiedades físicas del suelo”, “propiedades químicas del suelo” y “servicios ecosistémicos del suelo”. Entre los resultados, se destaca la interrelación entre las palabras clave que aparecen en los artículos más relevantes, como se muestra en la Figura 3.

El treemap muestra que los principales indicadores de calidad del suelo, como el nitrógeno (7%), el carbono (5%), y la materia orgánica (5%), junto con los factores de manejo (4%) y diversidad (5%), tienen una influencia moderada en la calidad del suelo en los sistemas agroforestales de café. Estadísticamente, el análisis sugiere que aumentar los niveles de estos indicadores podría mejorar significativamente la productividad de los sistemas agroforestales.



Figura 3. Resultado del análisis bibliométrico, en donde se muestra la frecuencia en que las palabras clave fueron citadas en los diferentes artículos científicos a través de un Treemap

El análisis de la Co-occurrence Network (figura 4) revela interacciones clave entre biodiversidad, diversidad, sistemas agroforestales y las propiedades del suelo (nitrógeno, carbono, materia orgánica y producción), destacando que la biodiversidad es un componente fundamental en la planificación y manejo de los sistemas agroforestales. Las relaciones entre diversidad y componentes del suelo (bosque, biomasa, comunidades) sugieren que la diversidad biológica influye en la estructura y función del suelo, lo que es esencial para la resiliencia de los ecosistemas. Además, las propiedades del suelo están interconectadas, indicando que el manejo de elementos clave como el nitrógeno y el carbono afecta directamente la calidad del suelo y la productividad agrícola. La conexión entre biodiversidad y propiedades del suelo subraya la necesidad de prácticas de manejo que mantengan la biodiversidad para mejorar la salud del suelo y optimizar los servicios ecosistémicos en los sistemas agroforestales.

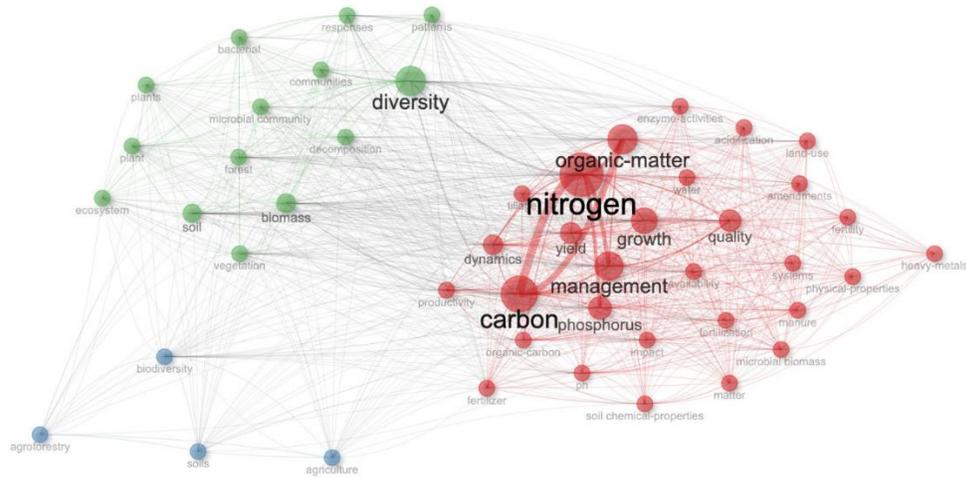


Figura 4. *El Co-occurrence Network, muestra relaciones entre nodos*

El análisis de correspondencia revela que la Dimensión 1 (eje X) explica el 3.15% de la varianza y agrupa temas relacionados con la agricultura alternativa, calidad del suelo, producción de cultivos, servicios ecosistémicos, y protección ambiental, lo que indica que gran parte de los estudios revisados se centran en la importancia de prácticas agrícolas sostenibles y su impacto en la preservación de la calidad del suelo y el medio ambiente. El nodo marrón dorado abarca estos temas, mostrando que un enfoque agroecológico puede mejorar la producción y conservar los recursos naturales. En contraste, la Dimensión 2 (eje Y), con una varianza explicada del 1.96%, agrupa temas relacionados con deforestación, fertilizantes, hongos, y agricultura en áreas antrópicas, estas actividades tienen un impacto negativo en los ecosistemas, como la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad. Este grupo temático, representado por el nodo rojo, sugiere la necesidad de regulaciones más estrictas para mitigar los efectos adversos de la agricultura convencional.

Por otro lado, los nodos azul, verde y morado agrupan temas relacionados con contaminación, metales pesados (como cobre, manganeso, hierro), adsorción y oligoelementos, que representan el impacto de la contaminación en los ecosistemas naturales y antrópicos. La fuerte correlación entre estos elementos indica que la calidad del suelo está

influenciada por la acumulación de metales pesados, lo que puede comprometer tanto la salud del suelo como los servicios ecosistémicos que provee, como la retención de nutrientes y la fertilidad.

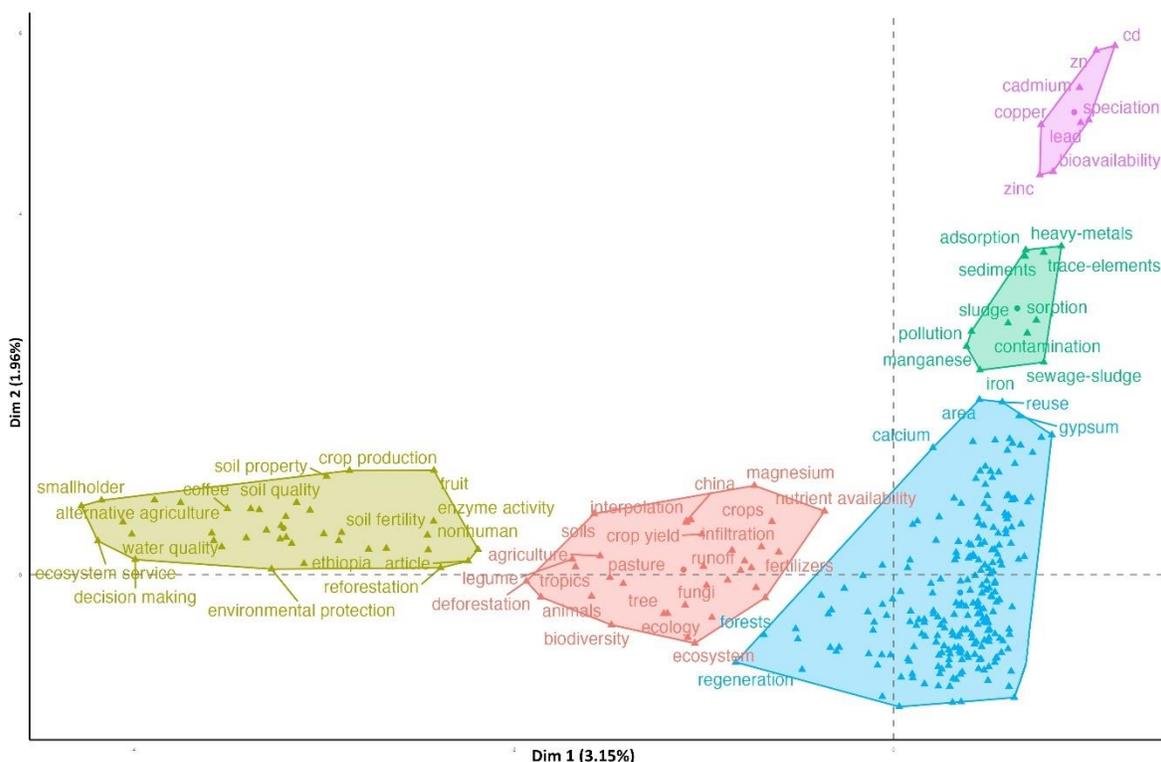


Figura 5. Nodos temáticos

El análisis bibliométrico permitió identificar los servicios ecosistémicos relacionados con los sistemas agroforestales de café, además, de determinar las propiedades del suelo utilizadas en el desarrollo de ICS, en este estudio han sido seleccionados 20 indicadores que están relacionados con la función del suelo que cumplen y los servicios ecosistémicos que pueden proveer y pueden ser observados en la tabla 5.

Tabla 5. Conjunto total de datos (CTD) para el desarrollo del ICS de sistemas agroforestales de café en el cantón Espíndola, Quilanga y Gonzanamá.

Indicador	Función del suelo	Servicio ecosistémico
Textura	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad física y apoyo. • Regular el flujo y almacenamiento de agua en el medio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Regulación de los procesos de los suelos • Mitigación al cambio climático • Adaptación al cambio climático • Provisión de hábitat • Ciclo hidrológico • Ciclo de nutrientes
pH	<ul style="list-style-type: none"> • Es esencial para el crecimiento vegetal • Servir como un filtro y tampón ambiental para la inmovilización y degradación de compuestos peligrosos 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento de la fertilidad del suelo • Soporte de biodiversidad • Control de erosión • Regula la calidad del agua • Regulación de la composición del aire • Regulación del clima • Regulación de los procesos de los suelos • Mitigación al cambio climático • Adaptación al cambio climático • Mitigación de la contaminación del aire • Provisión de hábitat
Conductividad eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Detecta los niveles de sal que pueden afectar de manera directa al crecimiento de las plantas. • A través de CE se puede saber la concentración de nutrientes presentes en el suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Regulación y soporte de la calidad del suelo y del agua • Provisión de hábitat • Mitigación al cambio climático
Carbono orgánico	<ul style="list-style-type: none"> • Ayuda en la fertilidad del suelo, ciclo de nutrientes, retiene agua y en la actividad biológica 	<ul style="list-style-type: none"> • Regulación del clima • Ciclo de nutrientes • Provisión de hábitat • Mitigación al cambio climático • Purificación del agua
Materia Orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Proporcionar un medio para el crecimiento vegetal y la actividad biológica. • Retener y entregar nutrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Regulación de la composición del aire • Regulación del clima

		<ul style="list-style-type: none"> • Regulación de los procesos de los suelos • Adaptación al cambio climático • Provisión de hábitat • Ciclo hidrológico • Ciclo de nutrientes • Mantenimiento de la fertilidad del suelo • Control de la erosión
<hr/>		
Fosforo		
Nitrógeno		
Potasio		
Calcio		
Magnesio		
Cobre		
Hierro	• Retener y entregar nutrientes.	
Manganeso	• Ayudan en la actividad biológica.	
Zinc	• Influyen en la disponibilidad de otros nutrientes	
Boro	• Son macro y micronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas	
Azufre		
Na ⁺		
K ⁺		
Ca ²⁺		
Mg ²⁺		

- Regulación de la composición del aire
- Regulación de los procesos de los suelos
- Mitigación al cambio climático
- Adaptación al cambio climático
- Mitigación de la contaminación del aire
- Provisión de hábitat
- Ciclo hidrológico
- Ciclo de nutrientes
- Regulación de la calidad del agua
- Mantienen la fertilidad del suelo
- Soporte para la producción agrícola

Nota: elaboración propia

6.2 Objetivo 2: Determinar el índice de calidad del suelo (ICS) mediante la integración de propiedades físicas y químicas en los sistemas agroforestales de café en la provincia de Loja (Espíndola, Quilanga, Gonzanamá).

6.2.1 Conjunto mínimo de datos (CMD)

Con base a los datos obtenidos en el laboratorio (Anexo 1) para los indicadores del CTD (Tabla 5), se desarrollaron los índices de calidad del suelo para los cantones Espíndola, Quilanga y Gonzanamá. El análisis de componentes principales (ACP) se realizó para evaluar la variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo en los tres cantones estudiados y determinar que variables forman parte del CMD a partir del CTD.

El gráfico de sedimentación para el promedio de los tres cantones, estableció 6 componentes principales a utilizar (Figura 6) que explican el 79% de la variabilidad total. El CP 1 representó el 29% de la variabilidad y estuvo influenciado principalmente por la materia y el carbono orgánicos. Los CP 2 y CP 3 explicaron el 14% y 12%, respectivamente, mientras que los CP 4, CP 5 y CP 6 contribuyeron con el 9%, 8% y 7% respectivamente. Aunque los últimos componentes presentan menor varianza, siguen siendo significativos al capturar tendencias clave sin perder información relevante. Los valores propios de los componentes restantes fueron menores a 1, por lo que no se consideraron.

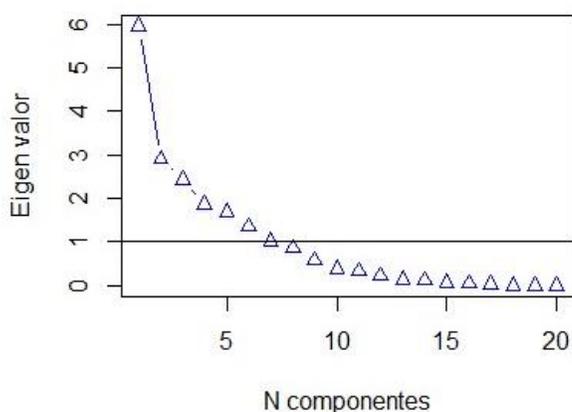


Figura 6. Gráfico de sedimentación del promedio de los tres cantones para determinar el número de componentes principales a utilizar en el ACP

En el peso final de los indicadores (tabla 6), donde los coeficientes más altos (mayores a 0.70 o menores a -0.70) revelan que las variables más influyentes en el análisis son la

materia y el carbono orgánicos, ambos con una correlación muy alta con el primer componente principal (CP 1), lo que confirma su rol crítico en la calidad del suelo en los sistemas agroforestales.

En contraste, los factores como la relación Magnesio/Potasio (Mg/K), el Potasio (K), y el Calcio (Ca^{2+}), que presentan correlaciones negativas significativas en diferentes componentes, indican que desequilibrios en estos nutrientes pueden tener efectos adversos en el suelo. Por lo tanto, estos indicadores deben manejarse cuidadosamente para evitar impactos negativos en la calidad del suelo. Los indicadores, tanto positivos como negativos, tienen una influencia sustancial en ICS y deben ser considerados prioritariamente en las estrategias de manejo de los sistemas agroforestales en la provincia de Loja.

Tabla 6. Componentes principales y similitudes para el modelo de seis componentes principales basado en los indicadores del CMD para el promedio de los tres cantones en estudio

Variables	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	Weighted Communality	Peso final
pH	-0,31	0,4	0,73*	-0,23	0,004	0,04	0,02	0,04
Nitrógeno (N)	0,73*	-0,45	-0,23	0,17	0,09	0,08	0,05	0,11
Azufre (S)	0,52	0,10	-0,15	-0,32	-0,03	0,13	0,02	0,05
Boro (B)	0,58	0,26	0,53	-0,24	-0,05	0,2	0,03	0,08
Potasio (K)	0,52	0,19	0,26	-0,01	-0,72*	0,07	-0,03	0,06
Magnesio (Mg)	-0,51	-0,42	0,57	-0,22	-0,27	0,19	0,009	0,07
Zinc (Zn)	0,66	-0,17	0,31	-0,36	0,03	0,08	0,04	0,09
Cobre (Cu)	0,50	-0,55	-0,05	-0,41	-0,07	-0,25	0,02	0,06
Manganeso (Mn)	0,52	-0,57	0,28	0,10	0,18	0,07	0,04	0,07
Ca/Mg	0,41	0,69	0,13	0,10	0,38	0,09	0,05	0,05
Mg/K	-0,76*	-0,45	0,27	-0,18	0,25	0,11	0,07	0,12
Ca+Mg/K	-0,70	-0,19	0,38	-0,16	0,45	0,17	0,08	0,10
Materia orgánica (MO)	0,86*	-0,25	0,19	0,21	0,07	0,11	0,07	0,15
Carbono orgánico (CO)	0,86*	-0,25	0,19	0,22	0,07	0,11	0,07	0,15
Limo	0,24	0,25	-0,43	-0,68	0,19	0,11	0,02	0,03
Arcilla	-0,32	-0,37	0,29	0,34	-0,35	-0,50	-0,01	0,03
Na^{+}	0,32	0,05	0,45	0,39	0,49	-0,10	0,05	0,03
K^{+}	0,09	0,55	0,13	0,40	-0,004	-0,01	0,008	0,01
Ca^{2+}	0,20	-0,06	0,03	-0,22	0,40	-0,75*	0,03	0,01
EC	0,35	0,43	0,34	-0,35	-0,14	-0,48	0,006	0,04
SS loadings	5,87	2,84	2,37	1,82	1,64	1,32	0,69	
Proportion Var	0,29	0,14	0,12	0,09	0,08	0,07	0,79	
Cumulative Var	0,29	0,44	0,55	0,65	0,73	0,79		
Weighted proportion	0,37	0,18	0,15	0,11	0,10	0,08		

Nota: * Indicadores considerados en el cálculo del ICS.

El gráfico de sedimentación para Espíndola, estableció 5 componentes principales a utilizar (Figura 7) que explican el 82% de la variabilidad total. El CP 1 representó el 27% de la variabilidad y estuvo influenciado principalmente por la materia y el carbono orgánicos las cuales mostraron cargas factoriales cercanas a 1, lo que indica su fuerte contribución al modelo y su relevancia para la calidad del suelo. Los CP 2 y CP 3 explicaron el 20% y 14%, respectivamente, mientras que los CP 4 y CP 5 contribuyeron con el 12% y 10%.

Es importante destacar que, aunque los componentes CP 3, CP 4 y CP 5 presentaron varianzas menores en comparación con el CP 1, siguen siendo componentes significativos, ya que contribuyen de manera acumulativa a la explicación de la variabilidad total del sistema. Además, los valores propios (eigenvalues) de los componentes restantes fueron menores que 1, lo que indica que estos no agregan suficiente información adicional y, por lo tanto, no fueron considerados.

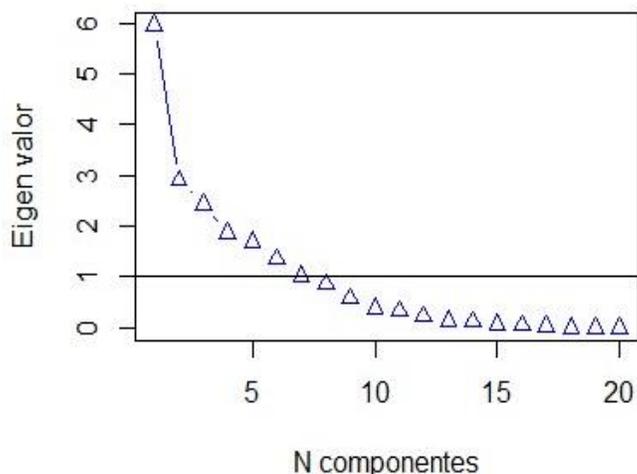


Figura 7. Gráfico de sedimentación del cantón Espíndola para determinar el número de componentes principales a utilizar en el APC

En el peso final de los indicadores (tabla 7), donde los coeficientes más altos (mayores a 0.70 o menores a -0.70) revelan que las variables más influyentes en el análisis son la materia y el carbono orgánicos, nitrógeno y manganeso tienen una correlación muy alta con el primer componente principal (CP 1), los indicadores como, el potasio intercambiable (K^+),

conductividad eléctrica (CE) tienen alta correlación con el CP2, siendo esenciales para aumentar la calidad del suelo en los sistemas agroforestales de café.

En contraste, los factores como, la relación Magnesio/Potasio (Mg/K), Zinc (Zn) el Calcio (Ca^{2+}), que presentan correlaciones negativas significativas en diferentes componentes, indican que desequilibrios en estos nutrientes pueden tener efectos adversos en el suelo. Por lo tanto, estos indicadores deben manejarse cuidadosamente para evitar impactos negativos en la calidad del suelo.

Tabla 7. Componentes y similitudes para el modelo de cinco componentes principales basado en los indicadores del CMD del cantón Espíndola

Variables	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	Weighted Communality	Peso final
pH	-0,61	0,42	-0,28	-0,49	-0,24	0,05	0,06
Nitrógeno (N)	0,80*	-0,34	0,15	0,09	-0,06	0,07	0,08
Azufre (S)	0,56	-0,29	-0,67	-0,16	0,01	0,05	0,05
Boro (B)	0,28	0,51	-0,60	-0,38	-0,16	0,03	0,03
Potasio (K)	0,32	0,57	-0,35	0,27	-0,43	0,03	0,03
Magnesio (Mg)	-0,38	-0,47	-0,41	-0,24	-0,48	0,03	0,03
Zinc (Zn)	0,47	-0,07	-0,71*	0,02	0,09	0,03	0,03
Cobre (Cu)	0,36	-0,48	-0,41	0,40	-0,44	0,03	0,03
Manganeso (Mn)	0,77*	-0,27	0,02	-0,13	0,33	0,07	0,07
Ca/Mg	-0,11	0,66	-0,05	-0,66	0,08	0,03	0,03
Mg/K	-0,50	-0,72*	-0,05	-0,36	-0,03	0,06	0,06
Ca+Mg/K	-0,57	-0,38	-0,07	-0,67	0,003	0,05	0,05
Materia orgánica (MO)	0,89*	-0,015	0,11	-0,34	-0,21	0,09	0,09
Carbono orgánico (CO)	0,89*	-0,015	0,11	-0,34	-0,21	0,09	0,09
Limo	-0,39	-0,19	-0,43	0,26	0,61	0,03	0,03
Arcilla	-0,005	0,25	0,6	0,11	-0,6	0,01	0,01
Na ⁺	0,58	0,15	0,23	-0,43	0,46	0,04	0,04
K ⁺	0,23	0,74*	0,10	-0,05	0,19	0,03	0,03
Ca ²	0,13	0,28	-0,31	0,27	0,26	0,01	0,01
EC	-0,33	0,76*	-0,30	0,32	-0,02	0,04	0,05
SS loadings	5,43	3,91	2,70	2,41	1,96	0,97	
Proportion Var	0,27	0,20	0,14	0,12	0,10	0,82	
Cumulative Var	0,27	0,47	0,60	0,72	0,82		
Weighted proportion	0,33	0,24	0,16	0,15	0,12		

Nota: * Indicadores considerados en el cálculo del ICS.

El gráfico de sedimentación para Quilanga, estableció 4 componentes principales a utilizar (Figura 8) que explican el 87% de la variabilidad total. El CP 1 representó el 48% de la variabilidad y estuvo influenciado principalmente por la materia y el carbono orgánicos y

nitrógeno las cuales mostraron cargas factoriales cercanas a 1, lo que indica su fuerte contribución al modelo y su relevancia para la calidad del suelo. Los CP 2 y CP 3 explicaron el 21% y 11%, respectivamente, mientras que los CP 4 contribuyeron con el 7%.

Es importante destacar que, aunque los componentes CP 2, CP 3 y CP 4 presentaron varianzas menores en comparación con el CP 1, siguen siendo componentes significativos, ya que contribuyen de manera acumulativa a la explicación de la variabilidad total del sistema. Además, los valores propios (eigenvalues) de los componentes restantes fueron menores que 1, lo que indica que estos no agregan suficiente información adicional y, por lo tanto, no fueron considerados.

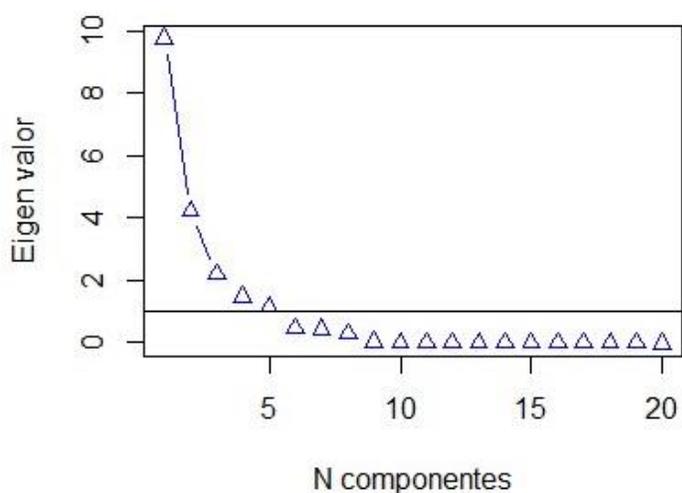


Figura 8. *Gráfico de sedimentación del cantón Quilanga para determinar el número de componentes principales a utilizar en el APC*

En relación con el peso final de los indicadores (Tabla 8), la materia orgánica, el carbono orgánico, la relación Ca+Mg/K, la relación magnesio-potasio (Mg/K), el nitrógeno, el manganeso y la conductividad eléctrica presentan la ponderación más alta, lo que indica su mayor impacto en el índice de calidad del suelo. Por otro lado, indicadores como el magnesio, el cobre, el limo y el potasio intercambiable tienen un peso menor, pero siguen siendo relevantes en el modelo de evaluación de la calidad del suelo.

Tabla 8. Componentes y similitudes para el modelo de cuatro componentes principales basado en los indicadores del CMD del cantón Quilanga

Variables	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Weighted Communality	Peso final
pH	0,49	-0,58	0,59	-0,05	0,10	0,03
Nitrógeno (N)	-0,93*	-0,15	-0,05	-0,03	0,26	0,08
Azufre (S)	-0,66	0,24	0,18	-0,39	0,13	0,04
Boro (B)	-0,64	-0,30	0,30	-0,52	0,13	0,04
Potasio (K)	-0,44	-0,63	0,26	-0,55	0,08	0,02
Magnesio (Mg)	0,61	-0,72*	0,22	-0,11	0,14	0,04
Zinc (Zn)	-0,67	-0,48	0,42	0,23	0,15	0,04
Cobre (Cu)	-0,74*	-0,46	-0,17	0,4	0,18	0,05
Manganeso (Mn)	-0,48	-0,79*	0,07	0,35	0,10	0,03
Ca/Mg	-0,63	0,67	0,19	0,0002	0,14	0,04
Mg/K	0,88*	-0,39	0,08	0,19	0,24	0,07
Ca+Mg/K	0,90*	-0,18	0,24	0,27	0,25	0,07
Materia orgánica (MO)	-0,91*	-0,31	-0,14	0,04	0,26	0,08
Carbono orgánico (CO)	-0,91*	-0,31	-0,14	0,04	0,26	0,08
Limo	-0,79*	0,22	0,12	0,22	0,19	0,06
Arcilla	0,39	-0,59	-0,59	0,08	0,07	0,02
Na ⁺	-0,43	0,41	0,55	0,24	0,07	0,02
K ⁺	0,45	0,29	0,74*	0,23	0,07	0,02
Ca ²⁺	-0,65	0,33	-0,07	0,25	0,13	0,04
EC	-0,84*	-0,30	0,13	0,21	0,22	0,06
SS loadings	9,68	4,16	2,17	1,46	3,25	
Proportion Var	0,48	0,21	0,11	0,07	0,87	
Cumulative Var	0,48	0,69	0,80	0,87		
Weighted proportion	0,55	0,24	0,12	0,08		

Nota: * Indicadores tomados en cuenta para el desarrollo de los ICS.

El gráfico de sedimentación para Gonzanamá identificó tres componentes principales (CP) (Figura 9), los cuales explican conjuntamente el 87% de la variabilidad total. El CP1, que representa el 46% de la variabilidad, está influenciado principalmente por el boro, azufre, materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno, los cuales presentan cargas factoriales cercanas a 1, indicando su alta contribución al modelo y su relevancia en la calidad del suelo. Los CP2 y CP3 explican el 25% y 17% de la variabilidad, respectivamente.

Aunque los últimos componentes presentan menor varianza, siguen siendo significativos al capturar tendencias clave sin pérdida sustancial de información. Los valores propios de los componentes restantes fueron menores a 1, por lo que no se consideraron en el análisis.

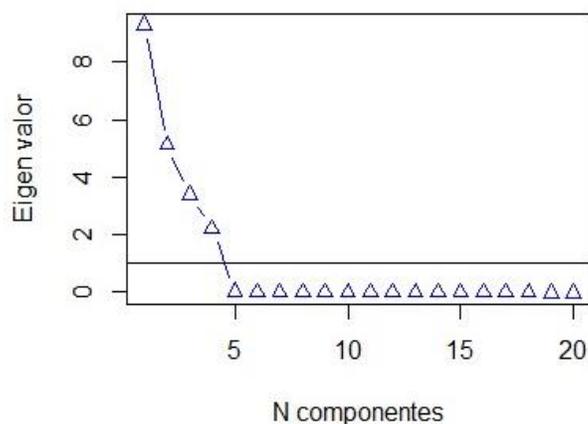


Figura 9. Gráfico de sedimentación del cantón Gonzanamá para determinar el número de componentes principales a utilizar en el APC

En el análisis del peso final de los indicadores (Tabla 9), los coeficientes más altos (valores absolutos mayores a 0.70) indican que las variables con mayor influencia en el modelo son pH, materia orgánica, carbono orgánico, boro, azufre, cobre, sodio intercambiable y conductividad eléctrica, los cuales tienen un impacto significativo en el Índice de Calidad del Suelo (ICS).

Por otro lado, indicadores como nitrógeno, potasio, la relación calcio-magnesio (Ca/Mg), Ca+Mg/K, la relación magnesio-potasio (Mg/K), potasio y calcio intercambiables presentan un peso menor en comparación con los anteriormente mencionados; sin embargo, continúan siendo relevantes en la evaluación de la calidad del suelo.

Dado que tanto los indicadores con impacto positivo como negativo influyen sustancialmente en el ICS, deben ser considerados prioritariamente en el diseño de estrategias de manejo para los sistemas agroforestales de café en el cantón Gonzanamá.

Tabla 9. Componentes y similitudes para el modelo de cuatro componentes principales basado en los indicadores del CMD del cantón Gonzanamá

Variables	CP 1	CP 2	CP 3	Weighted Communality	Peso final
pH	0,09	0,16	0,92*	0,03	0,012
Nitrógeno (N)	-0,82*	-0,46	-0,31	0,20	0,068
Azufre (S)	-0,86*	0,38	-0,29	0,21	0,072
Boro (B)	-0,98*	0,06	0,1	0,26	0,087
Potasio (K)	-0,50	0,81*	-0,23	0,12	0,041
Magnesio (Mg)	0,59	0,56	0,1	0,12	0,040
Zinc (Zn)	-0,62	0,34	0,42	0,12	0,040
Cobre (Cu)	0,23	-0,04	0,96*	0,04	0,016
Manganeso (Mn)	-0,22	0,00	-0,4	0,01	0,006
Ca/Mg	-0,62	-0,7*	0,03	0,14	0,048
Mg/K	0,71*	-0,51	0,26	0,16	0,053
Ca+Mg/K	0,49	-0,77*	0,25	0,11	0,039
Materia orgánica (MO)	-0,94*	-0,22	0,08	0,24	0,081
Carbono orgánico (CO)	-0,94*	-0,218	0,07	0,24	0,081
Limo	-0,66	-0,34	0,65	0,14	0,047
Arcilla	0,67	0,64	-0,19	0,157	0,052
Na ⁺	-0,16	0,95*	0,23	0,084	0,028
K ⁺	0,64	-0,71*	-0,18	0,154	0,051
Ca ²	0,82*	-0,24	-0,47	0,195	0,065
EC	-0,87*	-0,39	-0,26	0,220	0,073
SS loadings	9,11	5,05	3,33	3,012	
Proportion Var	0,46	0,25	0,17	0,875	
Cumulative Var	0,46	0,71	0,87		
Weighted proportion	0,52	0,29	0,19		

Nota: * Indicadores tomados en cuenta para el desarrollo de los ICS.

6.2.2 Transformación de los indicadores

Los resultados evidencian que los suelos de Espíndola, Quilanga y Gonzanamá presentan niveles adecuados de nitrógeno, con un promedio general de 52.01 mg/kg, aunque con variabilidad entre cantones. Espíndola muestra el mayor rango de nitrógeno (11.38 - 161.79 mg/kg), mientras que Gonzanamá tiene valores más bajos, con un promedio de 38.60 mg/kg, lo que sugiere que, si bien los niveles son adecuados para la producción agrícola, algunas áreas podrían requerir suplementación de nitrógeno.

La materia orgánica (MO) se encuentra dentro de valores aceptables, con un promedio de 3.40% en los tres cantones. Sin embargo, en Gonzanamá se registran valores más bajos

(1.77%), lo que indica la necesidad de aplicar enmiendas orgánicas para mejorar la fertilidad del suelo.

En cuanto al pH, los suelos presentan una ligera acidez con un promedio de 5.73, dentro del rango adecuado para la mayoría de los cultivos. No obstante, los niveles de potasio (K) son consistentemente bajos en todos los cantones (0.11 cmol/kg en promedio), lo que resalta la necesidad de fertilización potásica para optimizar la producción agrícola.

Las relaciones calcio-magnesio-potasio (Ca+Mg/K) presentan alta variabilidad, con un promedio de 114.78, lo que sugiere posibles desbalances en la disponibilidad de estos nutrientes y su absorción por las plantas.

Finalmente, la conductividad eléctrica (CE) es baja en los tres cantones (0.17 - 0.21 dS/m), indicando que no existen problemas significativos de salinidad en el suelo, lo cual es favorable para el desarrollo de los cultivos.

Tabla 10. Curvas de normalización de indicadores del CMD

Espíndola					
Indicador	U	Curva de puntuación	Min	Max	Promedio
N	cmol/kg	Más es mejor	11,38	161,79	54,77
Zn	cmol/kg	Más es mejor	0,06	1,93	0,43
Mn	cmol/kg	Más es mejor	0,51	11,63	3,76
Mg/K	cmol/kg	Óptimo	1,84	91,86	13,31
MO	%	Más es mejor	0,71	8,53	3,69
CO	%	Más es mejor	0,41	4,95	2,14
K ⁺	cmol/kg	Óptimo	0,1	0,97	0,52
CE	cmol/kg	Menos es mejor	0,07	0,37	0,20
Quilanga					
N	cmol/kg	Más es mejor	11,81	125,19	54,56
Mg	cmol/kg	Óptimo	0,07	13,88	3,85
Cu	cmol/kg	Óptimo	0,05	2,2	0,86
Mn	cmol/kg	Más es mejor	0,69	7,79	3,14
Mg/K	cmol/kg	Óptimo	1,67	227,1	44,97
Ca+Mg/K	cmol/kg	Óptimo	7,13	431,87	104,28
MO	%	Más es mejor	0,49	5,03	3,00
CO	%	Más es mejor	0,29	2,92	1,74
Limo	%	Óptimo	25,0	43,0	33,89
K ⁺	cmol/kg	Óptimo	0,14	0,54	0,34
CE	cmol/kg	Menos es mejor	0,05	0,25	0,17
Gonzanamá					
pH		Óptimo	5,87	6,58	6,20
N	cmol/kg	Más es mejor	26,77	57,81	38,60
S	cmol/kg	Óptimo	2,55	8,16	5,13
B	cmol/kg	Menos es mejor	0,14	0,61	0,30
K	cmol/kg	Óptimo	0,01	0,19	0,08
Cu	cmol/kg	Óptimo	0,30	0,77	0,47
Ca/Mg	cmol/kg	Óptimo	1,40	7,70	4,07
Mg/K	cmol/kg	Óptimo	7,20	136,7	63,50
Ca+Mg/K	cmol/kg	Óptimo	28,76	717,38	289,10
MO	%	Más es mejor	1,77	5,61	3,22
CO	%	Más es mejor	1,00	3,25	1,87
Na ⁺	cmol/kg	Óptimo	0,26	0,45	0,37
K ⁺	cmol/kg	Óptimo	0,21	0,25	0,24
CE	cmol/kg	Menos es mejor	0,16	0,27	0,21
Ca ²	cmol/kg	Más es mejor	10,68	29,36	19,30
Promedio de los tres cantones					
N	cmol/kg	Más es mejor	11,38	161,79	52,01
pH		Óptimo	4,69	7,23	5,73
K	cmol/kg	Óptimo	0,01	0,45	0,11
Mg/K	cmol/kg	Óptimo	1,67	227,10	31,17
Ca+Mg/K	cmol/kg	Óptimo	6,36	717,38	114,78
MO	%	Más es mejor	0,49	8,53	3,40
CO	%	Más es mejor	0,29	4,95	1,97
Ca ²	cmol/kg	Más es mejor	1,77	35,24	11,58

6.2.3 Índices de calidad del suelo

El análisis por cantón muestra diferencias significativas en los factores que determinan el ICS:

$$ICS = [0.15 * MO] + [0.15 * CO] + [0.13 * Ca/Mg] + [0.12 * N] + [0.11 * Ca+Mg/K] + [0.7 * K] + [0.4 * pH] + [0.02 * Ca^2]$$

Ecuación 4. Integración de pesos finales y valores moralizados de los Indicadores del CMD para el promedio de los tres cantones de la provincia de Loja.

En Espíndola (A), el Análisis de Componentes Principales (ACP) permitió la selección de ocho indicadores para la estimación del ICS, destacando como principales contribuyentes, los valores más influyentes en el índice corresponden a MO (0.093), CO (0.093) y N (0.08), lo que indica que la fertilidad del suelo en esta zona está fuertemente determinada por su contenido de materia orgánica y carbono. En contraste, indicadores como la relación Magnesio/Potasio (Mg/K) presentan una menor influencia en la calidad del suelo.

$$ICS = [0.093 * MO] + [0.093 * CO] + [0.08 * N] + [0.073 * Mn] + [0.062 * Mg/K] + [0.051 * CE] + [0.039 * K^+] + [0.03 * Zn]$$

Ecuación 5. Integración de pesos finales y valores moralizados de los Indicadores del CMD para el cantón Espíndola.

Para el cantón Quilanga (B), se identificaron once indicadores, entre los cuales N (0.082), la MO (0.08), el CO (0.081) y la Conductividad Eléctrica (0.068) presentan el mayor peso dentro del ICS, lo que sugiere una mayor importancia del equilibrio de materia orgánica y la disponibilidad iónica en la calidad del suelo.

$$ICS = [0.082 * N] + [0.081 * CO] + [0.08 * MO] + [0.078 * Ca+Mg/K] + [0.076 * Mg/K] + [0.068 * CE] + [0.06 * Limo] + [0.056 * Cu] + [0.04 * Mg] + [0.033 * Mn] + [0.023 * K^+]$$

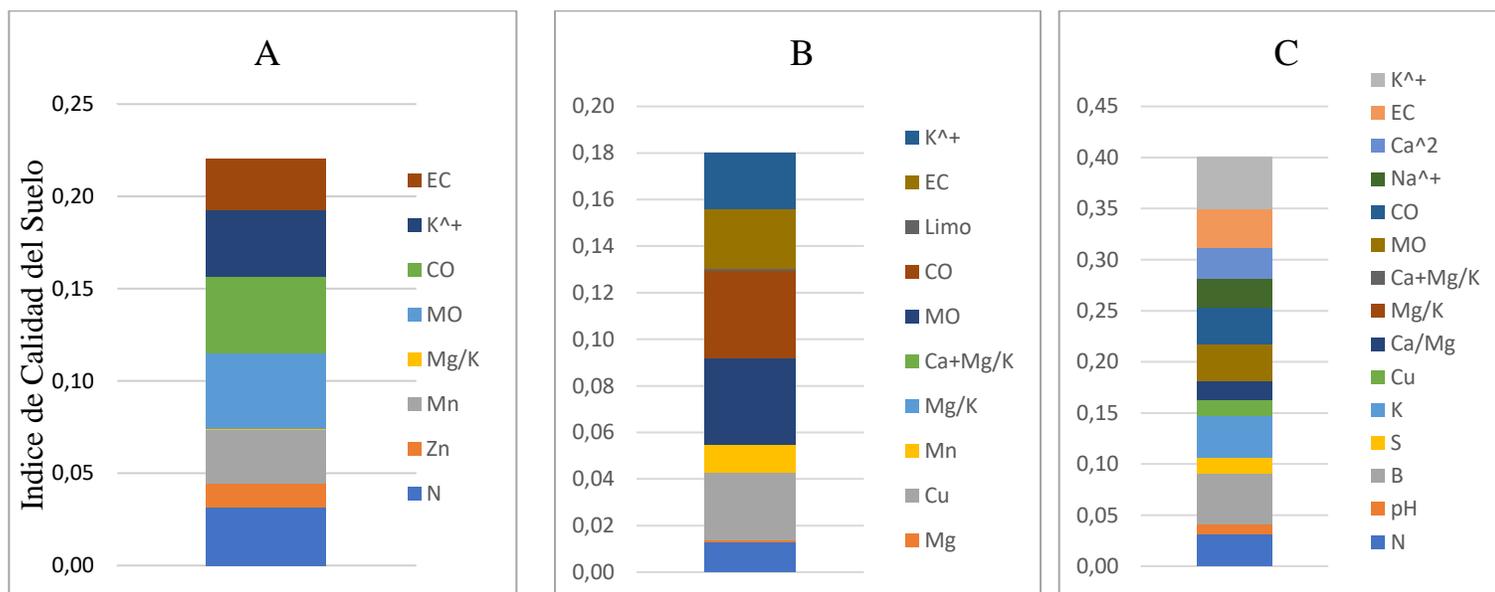
Ecuación 6. Integración de pesos finales y valores moralizados de los Indicadores del CMD para el cantón Quilanga.

En el cantón Gonzanamá (C), el modelo incluyó quince indicadores, con una mayor contribución de B (0.087), MO (0.081), el CO (0.08), el Potasio intercambiable (K^+ , 0.051) y la CE (0.073) al ICS. Estos resultados resaltan la relevancia de la fertilidad edáfica y la regulación de la salinidad en este cantón.

$$ICS = [0.087 * B] + [0.081 * MO] + [0.08 * CO] + [0.073 * CE] + [0.072 * S] + [0.068 * N] + [0.065 * Ca^2] + [0.053 * Mg/K] + [0.051 * K^+] + [0.048 * Ca/Mg] + [0.04 * K] + [0.037 * Ca+Mg/K] + [0.028 * Na^+] + [0.016 * Cu] + [0.012 * pH]$$

Ecuación 7. Integración de pesos finales y valores moralizados de los Indicadores del CMD para el cantón Gonzanamá.

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del (ICS) evidenciaron la calidad del suelo en los sistemas agroforestales de café y la contribución relativa de cada indicador (Figura 10).



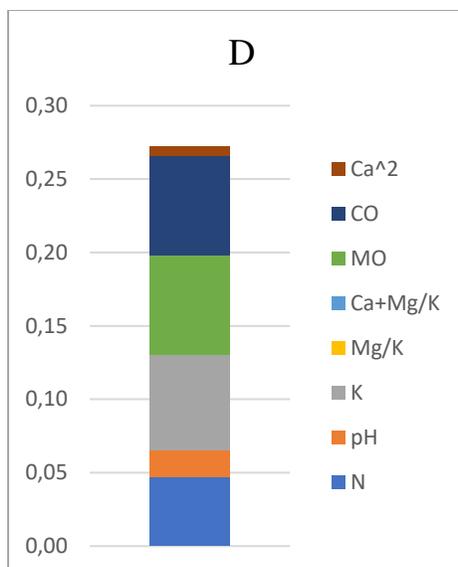


Figura 10. Índice de Calidad del Suelo donde: A: ICS del cantón Espíndola; B: ICS del cantón Quilanga; C: ICS del cantón Gonzanamá y D: ICS para el promedio de los tres cantones estudiados de la provincia de Loja

La Tabla 11 presenta el resumen de los valores del Índice de Calidad del Suelo (ICS) en los sistemas agroforestales de café, considerando el promedio de los tres cantones de la provincia de Loja y el análisis individual de cada uno. El cantón Gonzanamá exhibe una calidad moderada del suelo, con un ICS de 0.40, clasificado dentro de la clase 3. En contraste, el cantón Espíndola muestra una calidad baja (clase 4), mientras que Quilanga presenta la calidad más deficiente, con una clasificación de muy baja calidad (clase 5).

A nivel general, la calidad del suelo en los sistemas agroforestales de café de la provincia de Loja (considerando únicamente los cantones de Espíndola, Quilanga y Gonzanamá) se clasifica como baja (clase 4), con un ICS promedio de 0.27.

Tabla 11. Resumen del ICS para las zonas de estudio

Zona	ICS	Valor	Escala	Clase
Promedio de los tres cantones	Baja calidad	0.27	0.20 – 0.39	4
Cantón Espíndola	Baja calidad	0.22	0.20 – 0.39	4
Cantón Quilanga	Muy baja calidad	0.18	0.00 – 0.19	5
Cantón Gonzanamá	Moderada calidad	0.40	0.40 – 0.59	3

7. Discusión

La evaluación de la calidad del suelo en sistemas agroforestales de café es un proceso complejo debido a su naturaleza multifactorial y a la imposibilidad de medirla de manera directa. Su determinación depende de un conjunto de atributos edáficos específicos del contexto en el que se ubica, los cuales pueden ser representados mediante indicadores cuantificables. Estos indicadores están directamente relacionados con las funciones ecosistémicas del suelo y los servicios ecosistémicos (SE) que provee, estableciendo un vínculo entre la funcionalidad del suelo y su calidad (Ildefonso Pla, 2013). No obstante, estudios realizados por Bünemann et al. (2018) han demostrado que no existe un número exacto de indicadores para evaluar la calidad del suelo, ya que esta selección depende del contexto geográfico y de los objetivos de cada investigación.

Los SAF de café no solo contribuyen a la conservación del suelo y la regulación del clima mediante la captura de carbono, sino que también promueven la fertilidad edáfica y la sostenibilidad agroecológica (Pico-Mendoza et al., 2020; Kremer, 2021; Notaro et al., 2022). Estudios previos (Abera et al., 2021; Mayorga et al., 2020; Fahad et al., 2022) han demostrado que una gestión adecuada de los indicadores de calidad del suelo mejora la productividad agrícola y la conservación de la biodiversidad. Estos hallazgos reafirman la importancia de evaluar la calidad del suelo en SAF de café mediante indicadores funcionales, integrando servicios ecosistémicos con parámetros edáficos clave para su sostenibilidad a largo plazo (Cerdeira et al., 2020; Udawatta et al., 2019).

Los sistemas agroforestales (SAF) de café desempeñan un rol esencial en la regulación de los procesos ecosistémicos, promoviendo la estabilidad del sistema edáfico y la resiliencia ecológica del cultivo. La interacción entre las especies vegetales y el suelo genera sinergias que favorecen el equilibrio biogeoquímico, facilitando la acumulación de materia orgánica y la mejora en la disponibilidad de macro y micronutrientes esenciales (Pico-Mendoza et al., 2020; Kremer, 2021; Notaro et al., 2022). Además, la integración de especies leñosas en los SAF permite una regulación térmica del microclima y una reducción del impacto de temperaturas extremas, optimizando las condiciones para el desarrollo fenológico del café.

El análisis bibliométrico de 3654 artículos científicos permitió identificar los principales indicadores edáficos empleados en la literatura científica, conformando el conjunto total de datos (CTD). Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas (Chuncho y Arrellano, 2018; Hyun et al., 2022), donde se destaca la relación entre estos indicadores y las funciones ecosistémicas del suelo en los sistemas agroforestales de café. Por ejemplo, la acumulación de materia orgánica (MO) en estos sistemas, derivada de la caída de hojarasca y la descomposición de raíces y residuos vegetales, favorece la estabilidad estructural del suelo, mejora su porosidad y capacidad de retención hídrica, además de liberar gradualmente nutrientes esenciales a medida que se mineraliza. Este proceso tiene implicaciones directas en la biodiversidad edáfica, la mitigación del cambio climático, la purificación del agua y la provisión de hábitats para organismos del suelo (Victoria Quintero, 2019).

Bengal et al. (2007) destacan que el carbono orgánico del suelo (CO) en SAF de café es secuestrado de manera eficiente, ya que la vegetación arbórea y de cobertura captura dióxido de carbono de la atmósfera y lo almacena en forma de biomasa y materia orgánica edáfica. Negash et al. (2022) reafirman que este mecanismo no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también incrementa la calidad del suelo al mejorar su contenido de carbono orgánico, lo que optimiza la disponibilidad de nutrientes y la retención hídrica (Alvarado et al., 2013), así como la estabilidad estructural (Chatterjee et al., 2020).

Estudios de Ajayi et al. (2021) han evidenciado que el CO es determinante en la disponibilidad de nutrientes, ya que facilita la descomposición de la materia orgánica y la liberación progresiva de elementos esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), como lo menciona Sauvadet et al. (2019). Además, diversos estudios han demostrado la importancia del carbono y la materia orgánica en la sostenibilidad de los SAF de café y su impacto en la biodiversidad edáfica (Casanova et al., 2019; Sudharta et al., 2022; Negash et al., 2022).

Los macronutrientes como el nitrógeno (N) son clave en la fertilidad del suelo en SAF de café. Su fijación biológica, facilitada por especies leguminosas asociadas a bacterias del

género *Rhizobium*, convierte el N atmosférico en formas asimilables por las plantas, reduciendo la dependencia de fertilizantes nitrogenados y promoviendo una fertilidad edáfica sostenible. La disponibilidad de otros elementos esenciales, como potasio (K), magnesio (Mg) y azufre (S), así como micronutrientes como boro (B), hierro (Fe), cobre (Cu) y manganeso (Mn), depende de interacciones edafogeoquímicas que regulan su movilidad y absorción. Por ejemplo, la relación antagónica entre K y Mg puede alterar la absorción de estos cationes esenciales, afectando procesos metabólicos como la fotosíntesis y la síntesis de clorofila en las plantas de café. La regulación de estos elementos es crucial para evitar deficiencias nutricionales o toxicidades que comprometan la productividad agrícola (Kyrkby y Volker, 2007; Álvarez et al., 2020; Casanova et al., 2019; Sudharta et al., 2022; Sauvadet et al., 2019).

Investigaciones de Rekik et al. (2019) y Teixeira et al. (2022) han propuesto que estos indicadores pueden agruparse en un conjunto mínimo de datos (CMD) para ser integrados en índices compuestos que permitan evaluar la salud y funcionalidad del suelo de manera holística. En este sentido, el Índice de Calidad del Suelo (ICS), desarrollado por Andrews et al. (2002) y aplicado por Chunchu y Arrellano (2018), se ha consolidado como una metodología robusta debido a su facilidad de cálculo y su capacidad de integrar parámetros físicos, químicos y biológicos.

En el presente estudio, se identificaron 20 indicadores clave mediante análisis bibliométrico, constituyendo el CTD. Para el desarrollo del ICS, se seleccionaron indicadores específicos a partir del Análisis de Componentes Principales (ACP), definiendo un conjunto mínimo de datos (CMD) para cada cantón estudiado.

Para Espíndola, el CMD incluyó ocho indicadores: materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), nitrógeno (N), manganeso (Mn), relación magnesio/potasio (Mg/K), conductividad eléctrica (CE), potasio (K) y zinc (Zn). Ajayi et al. (2021) enfatizan la relevancia de la MO y el CO en la fertilidad edáfica, mientras que Martínez et al. (2023) destaca el papel del N en la productividad agrícola. Además, Cerda et al. (2020) resaltan la importancia de Mn, Mg, K y Zn en la nutrición vegetal y la calidad del suelo. Para Quilanga, el CMD se conformó con 11 indicadores: N, CO, MO, Ca+Mg/K, Mg/K, CE, limo, Cu, Mg, Mn y K. Mayorga et al. (2022) destacan la relevancia de las relaciones Ca+Mg/K y Mg/K en

la fertilidad del suelo, mientras que el limo mejora la textura edáfica, facilitando la retención de humedad y la aireación. En Gonzanamá, se identificaron 15 indicadores: B, MO, CO, CE, S, N, Ca, Mg/K, K, Ca/Mg, Na, Cu y pH. Kremer (2021) enfatiza la importancia de B y S en la fisiología vegetal, mientras que el pH regula la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana.

Varios estudios han considerado un número menor o igual de indicadores para evaluar la calidad del suelo en SAF de café. Por ejemplo, Chuncho y Pullaguari (2021) utilizaron cinco indicadores, Hyun et al. (2022) consideraron siete y Victoria Quintero (2019) diez. Esto evidencia que la selección de indicadores es altamente dependiente del contexto y los objetivos de investigación (Andrews et al., 2004). El desarrollo del ICS en Espíndola, Quilanga y Gonzanamá reveló que los principales componentes edáficos fueron materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno, conductividad eléctrica y boro. Los resultados indicaron índices de calidad del suelo de 0.40 (moderado) en Gonzanamá, 0.22 (bajo) en Espíndola y 0.18 (muy bajo) en Quilanga. Estas diferencias se deben a la variabilidad en las propiedades edáficas, condiciones climáticas y uso del suelo en cada cantón. En Gonzanamá, la gestión del suelo debe centrarse en la optimización de la relación Ca/Mg y la regulación del boro, mientras que en Espíndola y Quilanga se requieren estrategias para mejorar la materia orgánica, el nitrógeno y la disponibilidad de cationes esenciales, como lo sugieren Castanheira, (2020) y Júnior et al. (2022).

Los resultados obtenidos mediante el Índice de Calidad del Suelo (ICS) en los cantones Espíndola, Quilanga y Gonzanamá destacan la importancia de ciertos indicadores en la evaluación edáfica. La predominancia de la materia orgánica, el carbono orgánico y el nitrógeno como factores clave en Espíndola y Quilanga sugiere que la fertilidad del suelo en estas zonas está fuertemente influenciada por la presencia de materia orgánica y su capacidad para retener nutrientes esenciales. Esto concuerda con estudios previos que evidencian el papel fundamental de la materia orgánica en la mejora de la estructura del suelo y en la regulación del ciclo de nutrientes (Mendoza y Espinoza, 2017).

Por otro lado, la alta incidencia del boro y la conductividad eléctrica en Gonzanamá indica una dinámica del suelo diferenciada, posiblemente relacionada con factores como la mineralogía del suelo, el tipo de manejo agrícola o la presencia de aguas con alta salinidad.

La conductividad eléctrica, en particular, puede estar vinculada a procesos de lixiviación o acumulación de sales, lo que afectaría la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento de cultivos sensibles a la salinidad.

El análisis de componentes principales (ACP) respalda estos hallazgos al mostrar que los indicadores seleccionados explican entre el 79 % y el 87 % de la variabilidad total de los datos, lo que resalta su alta representatividad en la evaluación de la calidad del suelo. La selección de estos parámetros es adecuada para caracterizar los suelos, permitiendo identificar patrones diferenciados entre los cantones y posibles estrategias de manejo específicas para cada zona.

Los valores del ICS obtenidos indicaron diferencias en sus valores, lo cual pueden atribuirse a la variabilidad en las condiciones edafoclimáticas de cada cantón, donde factores como el régimen pluviométrico, la altitud y la composición mineralógica del suelo influyen en la disponibilidad de nutrientes y en los procesos de retención y lixiviación. La alta presencia de materia orgánica y carbono orgánico en los tres cantones favorece la estabilidad estructural del suelo y la retención hídrica; sin embargo, en Gonzanamá, el elevado contenido de calcio (0.82) genera una competencia iónica con magnesio y potasio, afectando su absorción por las plantas (Rigal et al., 2020).

Para la gestión edáfica en Gonzanamá, las estrategias deben centrarse en la optimización del balance de cationes y en la regulación del boro y la conductividad eléctrica, como lo recomienda Castanheira (2020). Además, estos resultados, coinciden con estudios sobre química del suelo que sugieren que estos parámetros tienen un impacto significativo en la fertilidad y productividad agrícola (Khan et al., 2023). Investigaciones previas han demostrado que un manejo eficiente de los indicadores edáficos puede mejorar la producción cafetalera y, simultáneamente, contribuir a la sostenibilidad ambiental y la conservación de la biodiversidad (Abera et al., 2021; Mayorga et al., 2020; Fahad et al., 2022; Silva et al., 2020; Teixeira et al., 2021).

En Espíndola y Quilanga, donde la calidad del suelo es más deficiente, se requiere la implementación de estrategias de restauración que incrementen los niveles de materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno, así como la corrección de parámetros edáficos limitantes como el pH y el contenido de potasio intercambiable. Estas medidas pueden incluir

la incorporación de compost, la aplicación de enmiendas orgánicas y la diversificación del sistema de cultivo mediante la inclusión de especies fijadoras de nitrógeno, estrategias que han sido ampliamente documentadas en la literatura como efectivas para mejorar la calidad edáfica (Júnior et al., 2022; Martínez et al., 2023).

Cabe destacar que la biodiversidad edáfica y la calidad del suelo están intrínsecamente relacionadas con la sostenibilidad de los SAF de café. Estudios de Cerda et al. (2020) y Udawatta et al. (2019) han enfatizado la interdependencia entre la biodiversidad del suelo y las prácticas de manejo agroecológico, señalando que la promoción de la diversidad biológica es un factor clave para la estabilidad a largo plazo de estos sistemas. Los hallazgos del presente estudio respaldan esta línea de investigación, proporcionando evidencia empírica sobre cómo las variables edáficas seleccionadas afectan la calidad del suelo y, en consecuencia, los servicios ecosistémicos que este puede proporcionar.

8. Conclusiones

La evaluación de la calidad del suelo en sistemas agroforestales de café en el cantón Espíndola, Quilanga y Gonzanamá de la provincia de Loja, identifico indicadores como materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno, potasio, pH, conductividad eléctrica, boro y limo, asociados con servicios ecosistémicos como la fertilidad edáfica, la dinámica de nutrientes, mitigación al cambio climático, capacidad de retención de humedad y la conservación de la biodiversidad. Evidenciando la importancia de estos indicadores para evaluar la funcionalidad y sostenibilidad del suelo en los SAF de café, fortaleciendo su valor en la gestión y conservación de estos sistemas productivos.

El análisis integrado del Índice de Calidad del Suelo (ICS) y de los parámetros edáficos específicos indica que el cantón Gonzanamá presenta las condiciones más favorables, con una calidad del suelo clasificada como moderada (ICS = 0,40) y valores promedio adecuados de boro, materia orgánica, carbono orgánico, conductividad eléctrica, nitrógeno y relaciones catiónicas (Mg/K y Ca+Mg/K), lo que refleja un equilibrio nutricional y estructural propicio para el desarrollo de sistemas agroforestales del cultivo de café. En contraste, Espíndola, con un ICS de 0,22 que denota baja calidad, evidencia niveles relativamente altos de materia y carbono orgánicos, lo que sugiere cierto potencial de recuperación bajo un manejo edafológico apropiado. Finalmente, Quilanga muestra la menor calidad del suelo (ICS = 0,18), con desequilibrios nutricionales marcados y deficiencias en varios indicadores clave, lo que exige la implementación urgente de prácticas de rehabilitación y manejo sostenible para mejorar la funcionalidad del suelo y su capacidad productiva en sistemas agroforestales cafetaleros.

9. Recomendaciones

En estudios futuros se podría utilizar indicadores biológicos, ya que influyen de manera directa en la calidad del suelo, además, la metodología utilizada puede ser útil para calcular la calidad del suelo en sistemas agroforestales de café en otros cantones de la provincia de Loja, con el fin de determinar que prácticas de gestión y manejo del suelo son adecuadas para mejorar su calidad y de esta manera se contribuye con información de apoyo para investigaciones futuras.

El ICS que se desarrolló el cual se basó en técnicas estadísticas, como el análisis de componentes principales (ACP) fue de gran importancia para poder evaluar la interacción entre los indicadores físicos y químicos del suelo, dado a su capacidad para determinar el peso final de cada indicador e identificar que indicadores serán considerados en el conjunto mínimo de datos para calcular el índice de calidad del suelo.

10. Bibliografía

- Abera, W., Tamene, L., Kassawmar, T., Mulatu, K., Kassa, H., Verchot, L., & Quintero, M. (2021). Impacts of land use and land cover dynamics on ecosystem services in the Yayo coffee forest biosphere reserve, southwestern Ethiopia. *Ecosystem Services*, 50, 101338. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101338>
- Ajayi, A. E., Tassinari, D., Araujo-Junior, C. F., Faloye, O. T., Abayomi, F., Dias Junior, M. de Souza, & Curi, N. (2021). Long-term no tillage management impact on soil hydro-physical properties in coffee cultivation. *Geoderma*, 404, 115306. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115306>
- Alvarado Jhon, A. J. S. M. (2013). *Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (Coffea arabica L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia*. SciELO Analytics.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90(1), 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). On-farm assessment of soil quality in California's Central Valley. *Agronomy Journal*, 94(1), 12–23. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.1200>
- Astier, M., Samper, M., & Yacher, L. (2006). Microclimate modification under agroforestry systems: Effects of a coffee (*Coffea arabica* L.)–*Inga densiflora* association on temperature and relative humidity. *Agroforestry Systems*, 67(1), 5–16.
- Benavides, A. (2013). Evaluación de los sistemas agroforestales para la elaboración de un plan de manejo y aprovechamiento sustentable de los recursos en el Ceypsa, parroquia Eloy Alfaro, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi.
- Bengal, W., Pramanik, S., & Chakraborty, P. B. (2007). Soil quality under different land uses in a micro-watershed of Sunderban in West Bengal. August 2016.

https://www.researchgate.net/profile/SanjitPramanik/publication/306016998_Soil_quality_under_different_land_uses_in_a_microwatershed_of_Sunderban_in_West_Bengal/links/57aad00108ae0932c96ffdea/Soil-quality-under-different-land-uses-in-a-micro-watershed-o

Blackmore, I., Iannotti, L., Rivera, C., Waters, W. F., & Lesorogol, C. (2021). Land degradation and the link to increased livelihood vulnerabilities among indigenous populations in the Andes of Ecuador. *Land Use Policy*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105522>

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils*. 14th edition. Pearson Prentice Hall.

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(January), 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

Burbano Hernán. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

Casanova, J. F., Rodríguez, J., & Ordoñez, M.-C. (2019). Impact of Nutritional Management on Available Mineral Nitrogen and Soil Quality Properties in Coffee Agroecosystems. *Agriculture*, 9(12), 260. <https://doi.org/10.3390/agriculture9120260>

Castanheira, D. T. (2020). *Coffee: Production and Research*. BoD – Books on Demand.

Cerda, R., Avelino, J., Harvey, C. A., Gary, C., Tixier, P., & Allinne, C. (2020). Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection*, 134, 105149. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105149>

- Chuncho Guillermo, & Pullaguari Alan. (2021). Evaluación de la calidad de los suelos de la zona urbana de Loja, a través de índices de calidad de suelos basados en servicios ecosistémicos. 186. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/29009>
- Chatterjee, N., Nair, P. K. R., Nair, V. D., Bhattacharjee, A., Filho, E. de M. V., Muschler, R. G., & Noponen, M. R. A. (2020). Do Coffee Agroforestry Systems Always Improve Soil Carbon Stocks Deeper in the Soil?—A Case Study from Turrialba, Costa Rica. *Forests*, 11(1), 49. <https://doi.org/10.3390/f11010049>
- Chuncho, C. G., & Arrellano, E. (2018). Evaluación de la calidad de los suelos de sistemas frutícolas de la Zona Central de Chile. 8(2), 75–90. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/496/391>
- Córdova, C. C. E. (2021). *Facultad Agropecuaria y de Recursos y Convencional, en Sistemas de Producción Cantón*. Universidad Nacional de Loja.
- Correia, R. M., Andrade, R., Tosato, F., Nascimento, M. T., Pereira, L. L., Araújo, J. B. S., Pinto, F. E., Endringer, D. C., Padovan, M. P., Castro, E. V. R., Partelli, F. L., Filgueiras, P. R., Lacerda, V., & Romão, W. (2020). Analysis of Robusta coffee cultivated in agroforestry systems (AFS) by ESI-FT-ICR MS and portable NIR associated with sensory analysis. *Journal of Food Composition and Analysis*, 94(March). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103637>
- Cotler, H., Sotelo, E., Dominguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). *La conservación de suelos: un asunto de interés público*. Instituto Nacional de Ecología, México.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90–97. <https://core.ac.uk/download/pdf/16362056.pdf>
- Cuenca, G. (2018). *Caracterización de la vegetación y el microclima en sistemas agroforestales café (Coffea arabica L.) en tres pisos altitudinales del cantón Puyango en la provincia de Loja*.

- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., & Grêt-Regamey, A. (2018). Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94(June), 151–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>
- Fahad, S., Chavan, S. B., Chichaghare, A. R., Uthappa, A. R., Kumar, M., Kakade, V., Pradhan, A., Jinger, D., Rawale, G., Yadav, D. K., Kumar, V., Farooq, T. H., Ali, B., Sawant, A. S., & El-Keblawy, A. (2020). Soil quality in agroecosystems. *Ecological Indicators*, 111, 106062. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106062>
- Galdos, M. V., Schimel, D. S., Sampaio, E. V. S. B., & Santos, F. P. (2017). Soil organic carbon stocks in agroforestry systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 240, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.001>
- Gandia, J. A., García, M., Ortega, D., & Recalde, S. (2019). Diversidad, riqueza y calidad del suelo en los sistemas de cultivo de café (*Coffea arabica*) y cacao (*Theobroma cacao*) en el cantón Loja. *Revista de Ciencias Ambientales*, 13(2), 1–13. <https://doi.org/10.18756/rca.2019.14.2.5721>
- Gallardo, J. A., & Cedeño, L. (2019). Caracterización y evaluación de la calidad del suelo en el cantón Loja, Ecuador. *Revista de Ciencias Agropecuarias*, 4(1), 12–23. <https://doi.org/10.15446/rca.v4n1.78366>
- Gehl, R. J., Carr, M. K. V., & Gaskin, J. W. (2018). Soil quality in coffee agroforestry systems in the highlands of southern Mexico. *Agroforestry Systems*, 92(4), 1201–1215. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0280-0>
- Giné, A., Carles, A., & López, F. (2014). *El suelo como recurso y su importancia en la sostenibilidad de los sistemas de cultivo*. Universitat Politècnica de València.
- González, A., & Rodríguez, M. A. (2022). Soil quality indicators as affected by land use and management practices in coffee production systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(2), 514–528. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00616-1>
- Gómez, A., Guzmán, M., & López, D. (2016). *Análisis de la calidad del suelo en sistemas agroforestales y su relación con la productividad del café en la región de Nariño, Colombia*.

- Houghton, R. A., Goodall, J. G., & Peters, J. R. (2020). Soil management and its role in coffee production: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), 111–120. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.2.111>
- Huerta, M. (2020). Caracterización de la calidad de suelos en el cultivo de café bajo sistemas agroforestales en la región de la Sierra Norte de Puebla. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 40(2), 55–68. <https://doi.org/10.22267/rcia.204002.89>
- Isla, F. R., Acuña, C., & Romero, M. (2021). *La calidad de los suelos en el cultivo de café en sistemas agroforestales*. Universidad Técnica de Ambato.
- Jackson, M. L. (1958). *Soil Chemical Analysis*. Prentice Hall.
- Jara, J. M., & Ortega, R. (2017). *Evaluación de los sistemas de cultivo en café y su relación con la calidad del suelo en el Valle del Cauca*. Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- Jiménez, J. A., & Naranjo, C. M. (2020). *Sistemas de cultivo de café y sus efectos sobre la calidad del suelo en la región de Quindío*. Fundación Universitaria de San Gil.
- Kantor, E., A. R., & Aguilar, H. (2020). *Evaluación de la calidad del suelo en sistemas de producción de café bajo prácticas agroecológicas*. Revista Agroecológica.
- Karlen, D. L., Andrews, S. S., & Cambardella, C. A. (2001). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 1–16. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.0104>
- Koutika, L.-S., & Mando, A. (2012). Soil quality indices for sustainable land management in the Sahel region. *Soil Use and Management*, 28(2), 181–191. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00377.x>
- Kumar, M., & Singh, S. P. (2021). Impact of Coffee Agroforestry Systems on Soil Quality and Ecosystem Services. *Agroforestry Systems*, 95(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00535-0>

- Macedo, J. S., Ferreira, L. A., Silva, E. F., & Ribeiro, L. S. (2021). Coffee production and soil quality: The role of agroforestry systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 76(4), 107–118. <https://doi.org/10.2489/jswc.76.4.107>
- Marqués, M., Silva, A., & Andújar, J. (2019). Soil quality and ecosystem services in coffee agroforestry systems. *Land Degradation & Development*, 30(3), 291–305. <https://doi.org/10.1002/ldr.3064>
- Martínez, J. G., Aponte, M., & Hernández, J. (2021). Evaluación de la calidad del suelo en sistemas agroforestales de café en el suroeste de Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 15(1), 1–12. <https://doi.org/10.18756/rca.2021.15.1.6002>
- Milla, M., & Delgado, A. (2016). Calidad del suelo en cafetales con y sin cobertura en la región del Catatumbo, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(2), 35–45. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10n2a3>
- Moreira, J. A., & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia do solo*. Editora UFV.
- Mota, F. C., & Silva, M. L. (2020). Soil quality indicators for coffee agroforestry systems. *Agricultural Systems*, 184, 102926. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102926>
- Müller, T., & Eick, B. (2020). The influence of shade trees on soil properties and coffee yield: A case study in the highlands of Ethiopia. *Soil Science Society of America Journal*, 84(4), 1062–1074. <https://doi.org/10.2136/sssaj2019.08.0292>
- Obando, A., Vargas, H., & Castro, J. (2020). Soil quality indicators in coffee agroforestry systems in the Central Andes. *Agroforestry Systems*, 94(6), 1837–1850. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00552-z>
- Oehl, F., de Miranda, M. R., & Soria, A. (2022). Soil organic carbon and its relation to coffee yield in agroforestry systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(3), 754–765. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00656-7>
- Oliveira, F. G., & Silva, T. C. (2017). Soil quality in coffee agroforestry systems: Effects of tree cover on soil properties. *Ecological Indicators*, 78, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.036>

- Paredes, S., & Ceballos, M. (2015). Soil organic carbon in coffee agroforestry systems in the Colombian Andes. *Soil Use and Management*, 31(3), 432–440. <https://doi.org/10.1111/sum.12173>
- Pérez, J., Rodríguez, M., & Marín, R. (2021). Evaluation of soil quality under different coffee cultivation practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 317, 107446. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107446>
- Romero, A. J., & González, J. (2019). Impact of agroforestry on soil properties and coffee yield in Colombia. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(1), 123–134. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00001-2>
- Rueda, M., & Benítez, M. (2020). Evaluación de indicadores de calidad del suelo en sistemas agroforestales de café en la región de Amazonía. *Revista de Ciencias Agropecuarias*, 5(2), 14–25. <https://doi.org/10.15446/rca.v5n2.81101>
- Sánchez, A., & Castillo, M. (2021). *Sistemas agroforestales en la producción de café y su impacto en la calidad del suelo*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Searle, R. J., & Owens, S. (2018). Soil quality and sustainable management practices in coffee agroforestry systems. *Sustainable Agriculture Research*, 7(4), 152–162. <https://doi.org/10.5539/sar.v7n4p152>
- Silva, J. C., & Lima, A. (2020). The role of agroforestry systems in enhancing soil quality for coffee cultivation. *Environmental Management*, 66(5), 1039–1051. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01373-0>
- Taboada, M., & García, J. (2021). Soil quality assessment under different coffee agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 316, 107411. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107411>
- Tejada, M., González, J. L., & Romero, M. (2015). Impact of coffee agroforestry systems on soil physical properties and carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, 79(4), 1085–1096. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.02.0078>

- Vargas, M. J., & Figueroa, R. (2019). Soil organic matter and its role in coffee agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, *130*, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.01.017>
- Velasco, J., & Rivas, R. (2022). The effect of different agroforestry practices on soil quality in coffee systems. *Agroforestry Systems*, *96*(2), 365–379. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00660-2>
- Wang, H., & Chen, X. (2017). Soil quality indicators and their relationship with coffee production. *Land Degradation & Development*, *28*(5), 1580–1593. <https://doi.org/10.1002/ldr.2770>
- White, R. E., & Kaufman, J. (2020). Soil quality and sustainable coffee production: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, *75*(5), 131–140. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.5.131>
- Zhan, Z., Zhang, C., & Zhang, W. (2019). Soil health and quality in coffee production systems: A meta-analysis. *Ecological Indicators*, *103*, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.018>

11. Anexos

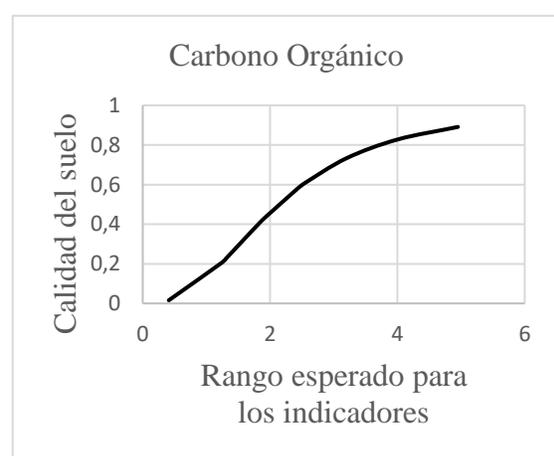
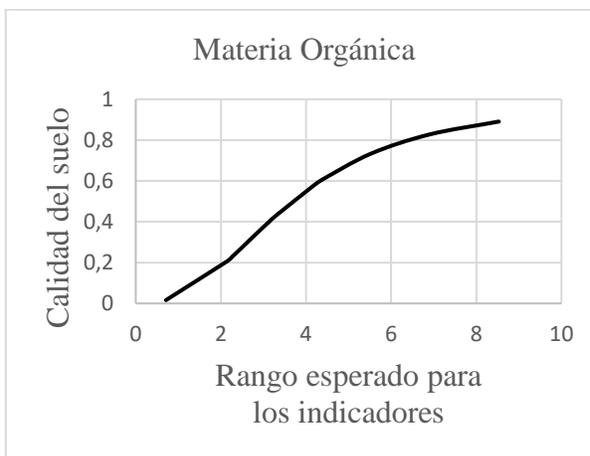
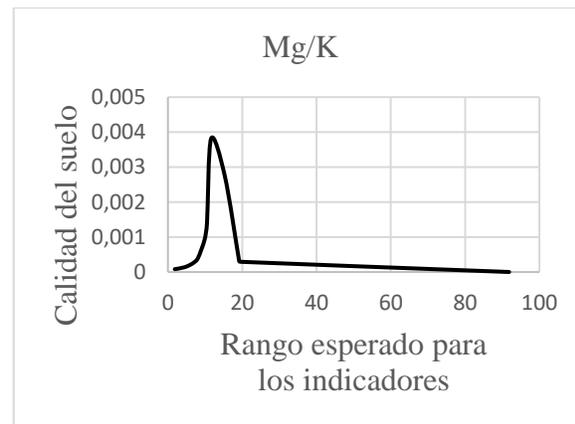
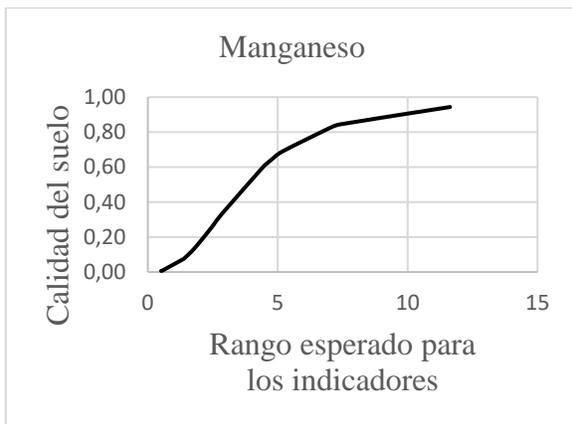
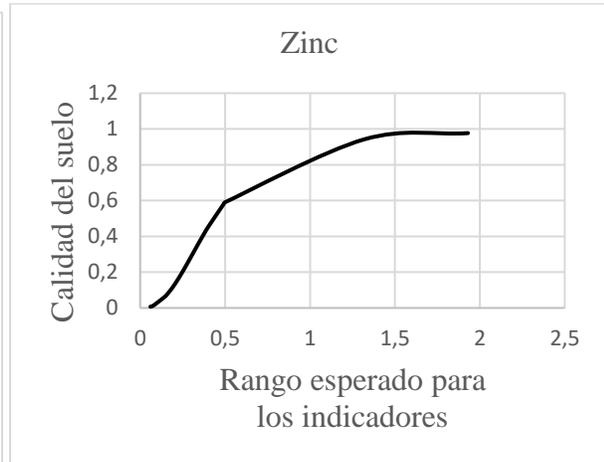
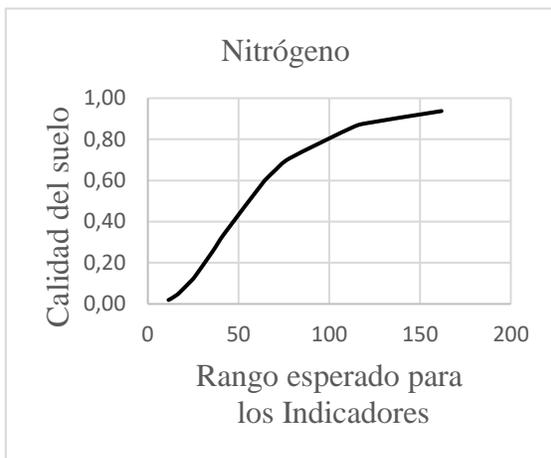
Anexo 1. Resultados del análisis de laboratorio

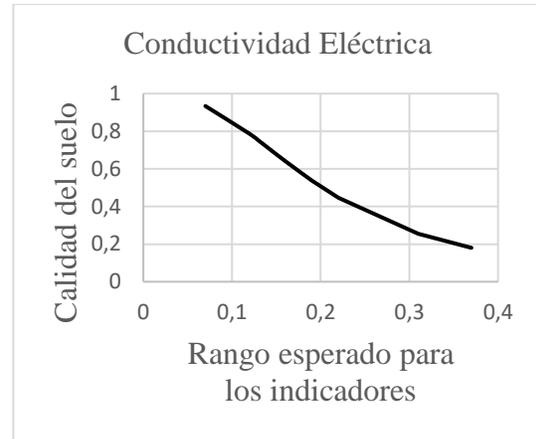
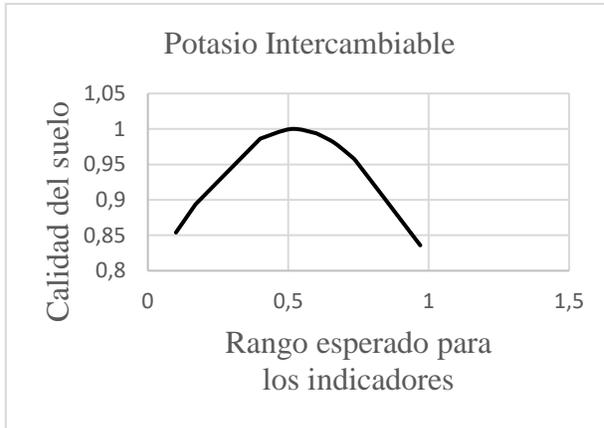
Cantones	pH	N	S	B	K	Mg	Zn	Cu	Mn	Ca/Mg	Mg/K	Ca+Mg/K	MO	CO	Limo	Arcilla	Na^	K^	Ca^2	EC
Espindola	6,52	16,09	3,54	0,3	0,09	1,02	0,2	0,13	2,84	12,04	6,9	89,98	4,25	2,47	33	32	0,33	0,72	3,15	0,22
Espindola	6,75	16,78	2,76	0,21	0,05	0,81	0,06	0,08	1,91	14,99	10,52	168,23	2,44	1,41	27	34	0,33	0,72	3,15	0,22
Espindola	6,98	24,33	3,81	0,43	0,3	0,97	0,49	0,44	1,38	10,19	1,99	22,24	2,77	1,6	31	32	0,13	0,6	7,05	0,37
Espindola	7,23	26,21	3,29	0,38	0,32	0,98	0,28	0,31	0,51	10,52	1,91	22,01	2,26	1,31	31	28	0,13	0,6	7,05	0,37
Espindola	5,37	113,12	4,9	0,22	0,1	1,92	0,34	0,65	4,55	4,08	11,62	59,04	8,53	4,95	23	28	0,23	0,17	2,38	0,07
Espindola	5,34	121,61	3,82	0,18	0,05	1,61	0,15	0,54	4,46	3,77	19,39	92,44	4,37	2,54	33	30	0,23	0,17	2,38	0,07
Espindola	5,11	70,5	4,27	0,23	0,09	0,81	0,21	0,36	4,77	3,21	5,25	22,11	4,21	2,44	37	26	0,26	0,4	3,9	0,14
Espindola	5,1	77,85	3,78	0,19	0,13	0,39	0,15	0,38	2,53	2,46	1,84	6,36	2,97	1,73	35	26	0,26	0,4	3,9	0,14
Espindola	5,93	16,44	4,81	0,28	0,19	2,44	0,24	0,31	7,41	3,61	8,09	37,25	3,13	1,81	29	26	0,44	0,17	17,1	0,16
Espindola	6,02	12,78	5,42	0,22	0,11	2,65	0,38	0,46	1,38	3,99	15,29	76,35	2,16	1,25	43	22	0,22	0,65	10,42	0,31
Espindola	6,29	11,38	2,97	0,13	0,04	5,46	0,18	0,52	0,56	1,72	91,86	250,02	0,71	0,41	41	30	0,05	0,1	3,59	0,19
Espindola	4,86	64,09	4,39	0,2	0,45	1,7	0,5	0,5	7,08	2,61	2,36	8,53	5,52	3,2	25	52	0,22	0,72	5,12	0,31
Espindola	4,8	42,14	2,41	0,13	0,08	0,37	0,08	0,38	1,6	2,6	2,75	9,88	2,92	1,69	25	56	0,21	0,74	13,69	0,22
Espindola	6,3	35,93	3,55	0,19	0,05	1,44	0,4	0,2	2,42	5,36	19,18	121,98	3,29	1,91	27	40	0,37	0,97	12,5	0,12
Espindola	5,42	161,79	5,28	0,38	0,08	1,34	1,93	1,18	5,17	4,11	9,89	50,56	6,9	4	27	28	0,25	0,68	11,35	0,13
Espindola	4,69	65,34	4,17	0,2	0,06	0,37	1,32	0,27	11,63	4,52	4,06	22,41	2,53	1,47	45	16	0,32	0,51	11,89	0,19
Quilanga	4,72	47,39	4,57	0,13	0,01	0,07	0,03	0,36	0,8	6,45	4,69	34,95	2,51	1,46	33	30	0,13	0,23	29,05	0,14
Quilanga	5,26	75,56	7,47	0,33	0,12	0,33	0,44	0,31	1,58	9,16	1,75	17,75	3,41	1,98	43	14	0,23	0,45	35,25	0,23
Quilanga	5,38	39,71	3,54	0,17	0,05	2,6	0,61	2,16	7,79	1,19	33,84	74,12	3,21	1,86	39	40	0,08	0,31	10,3	0,18
Quilanga	5,07	84,18	8,88	0,26	0,19	0,51	0,15	0,71	1,8	3,27	1,67	7,13	4,4	2,55	35	40	0,07	0,14	7,8	0,14
Quilanga	5,3	19,66	8,57	0,14	0,02	0,41	0,18	0,3	0,82	5,08	12,14	73,82	1,48	0,86	37	32	0,15	0,54	6	0,12
Quilanga	5,47	67,31	5,18	0,26	0,14	4,65	0,28	1,46	5,1	1,18	21,02	45,79	4,24	2,46	35	44	0,17	0,16	31,4	0,25
Quilanga	5,61	20,19	4,6	0,2	0,07	11,3	0,15	0,17	1,95	1,2	96,95	213,7	2,18	1,27	25	38	0,07	0,37	1,77	0,16

Quilanga	5,88	11,81	3,17	0,14	0,04	13,88	0,02	0,05	0,69	0,9	227,1	431,87	0,49	0,29	25	38	0,1	0,49	3,78	0,05
Quilanga	5,63	125,19	7,39	0,19	0,11	0,94	1,73	2,2	7,72	6,01	5,61	39,36	5,03	2,92	33	32	0,15	0,37	7	0,23
Gonzanamá	5,87	57,81	5,23	0,31	0,02	1,36	0,18	0,3	5,86	7,7	39,71	345,29	4,14	2,4	29	30	0,26	0,25	21,14	0,27
Gonzanamá	6,58	29,61	2,55	0,18	0,01	2,39	0,2	0,77	1,4	4,25	136,7	717,38	2,32	1,34	33	42	0,32	0,25	18,32	0,18
Gonzanamá	6,03	26,77	3,1	0,14	0,03	6,34	0,23	0,44	7,88	1,4	121,51	291,99	1,77	1,03	21	60	0,38	0,24	29,36	0,16
Gonzanamá	6,29	45,56	8,16	0,61	0,13	2,64	0,69	0,52	6,37	4,02	12,36	62,1	5,61	3,25	35	32	0,45	0,21	10,68	0,24
Gonzanamá	6,21	33,26	6,61	0,24	0,19	2,23	0,17	0,33	1,67	2,99	7,2	28,76	2,26	1,31	25	66	0,42	0,23	16,99	0,2

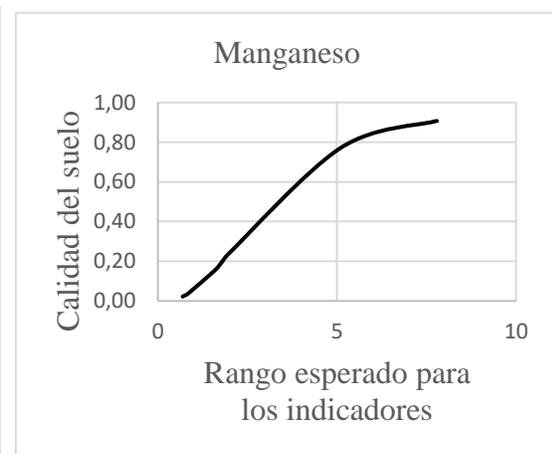
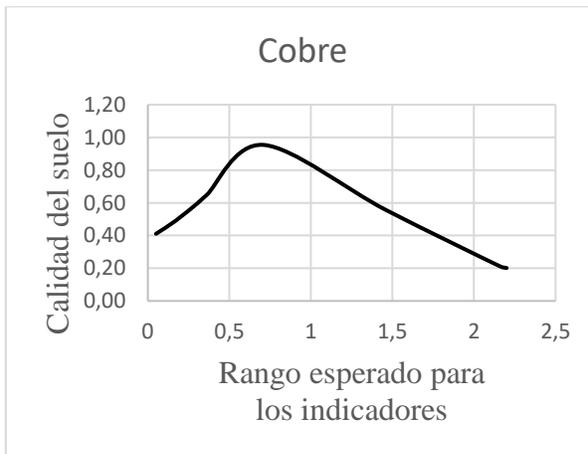
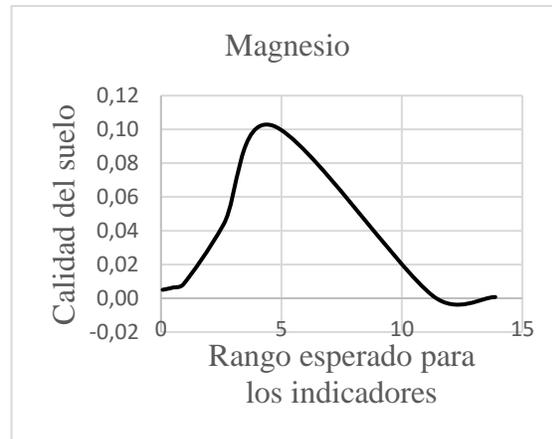
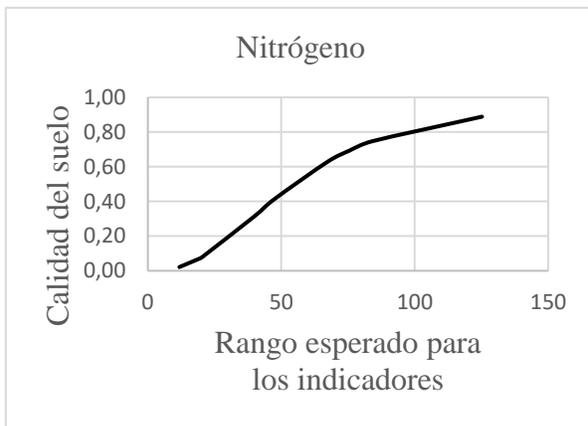
Anexo 2. Gráficas de indicadores Normalizados

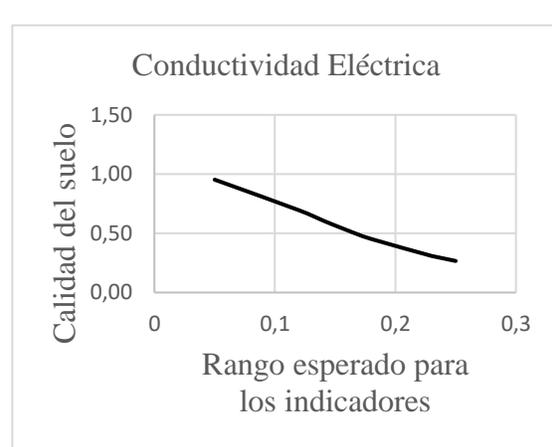
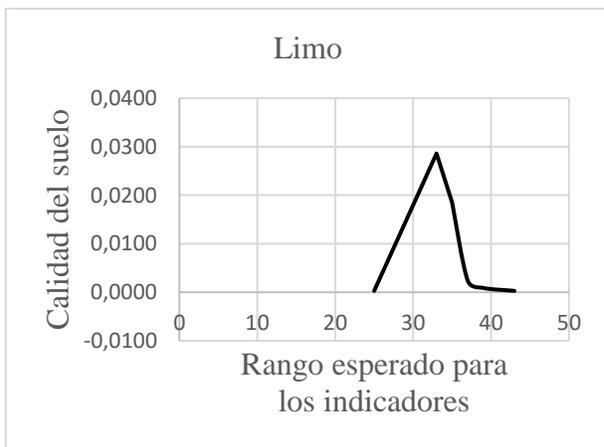
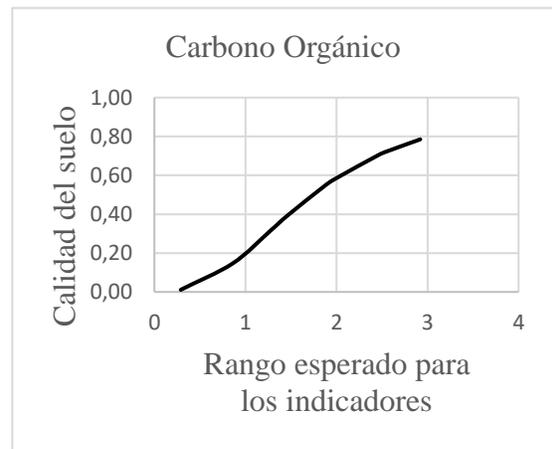
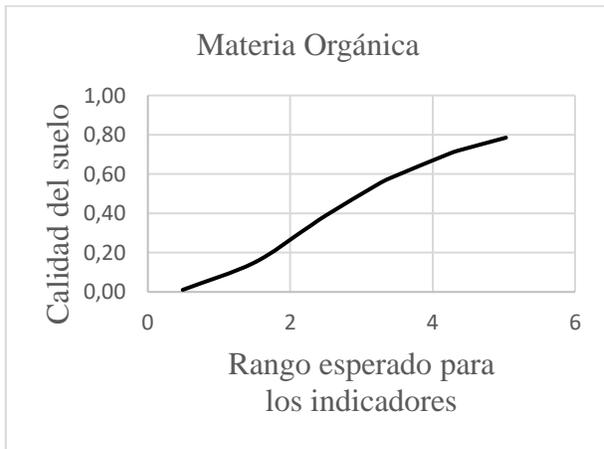
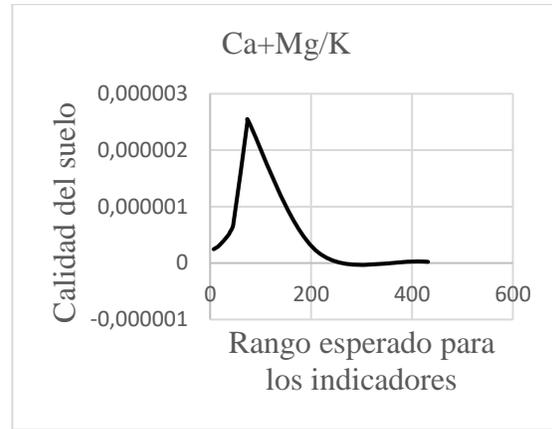
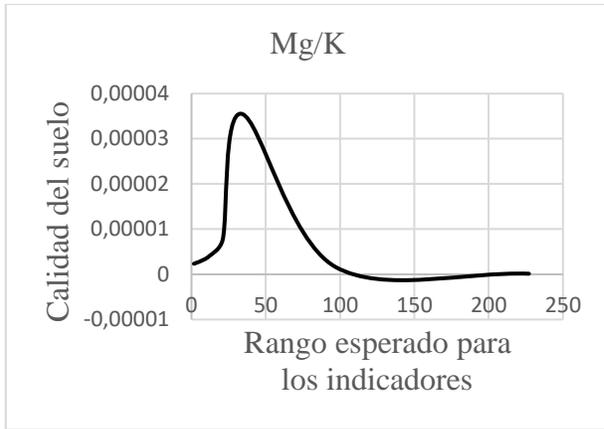
Cantón Espíndola

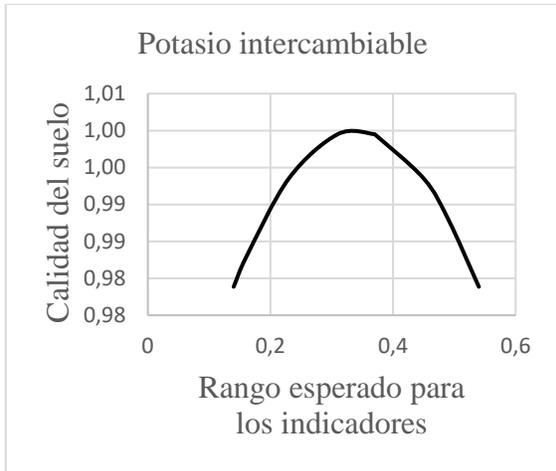




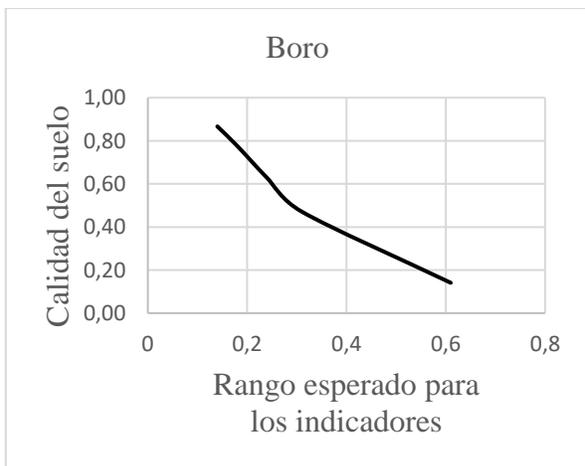
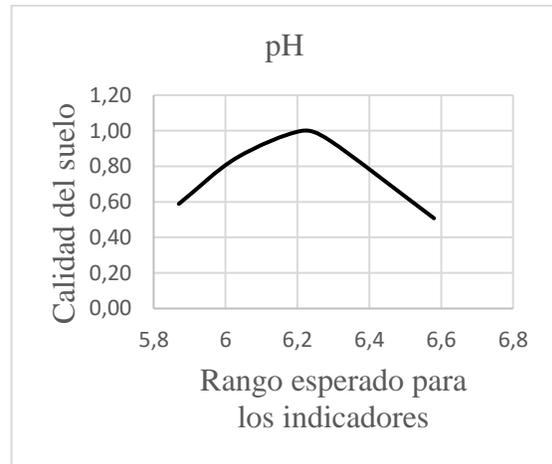
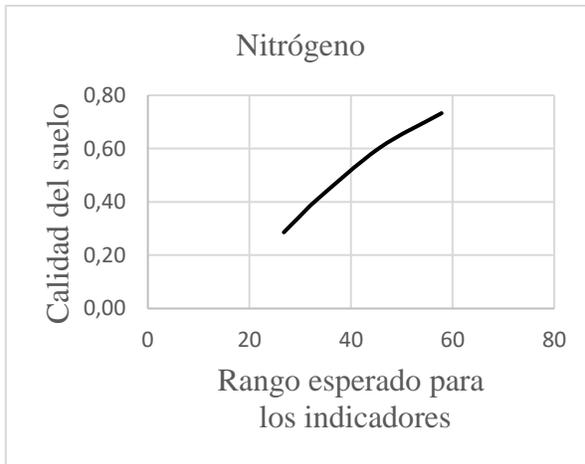
Cantón Quilanga

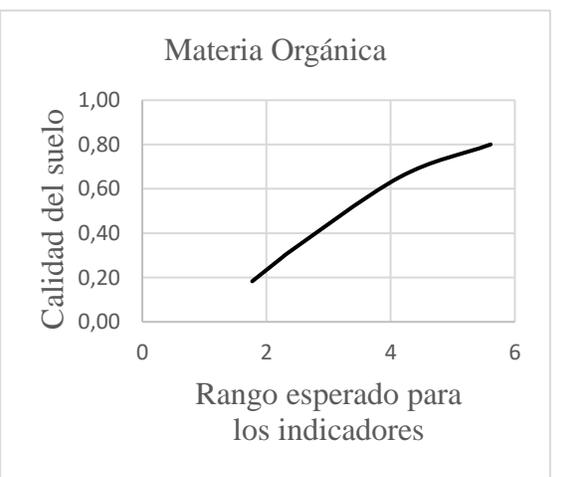
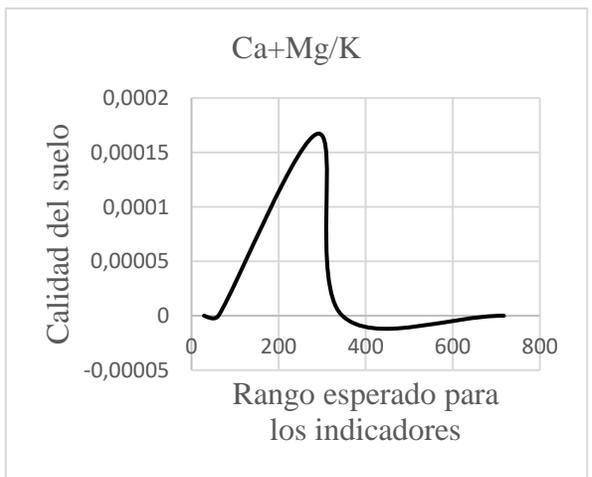
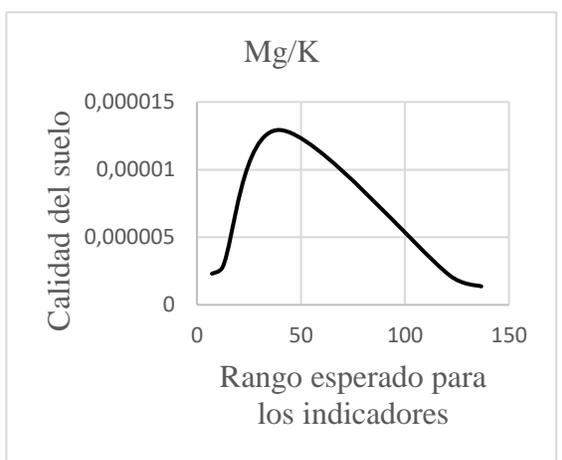
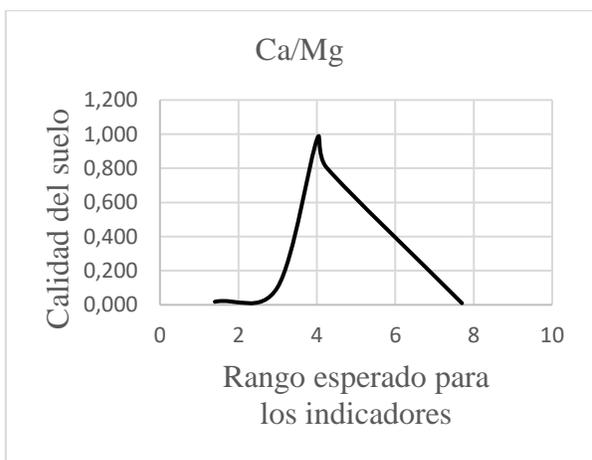
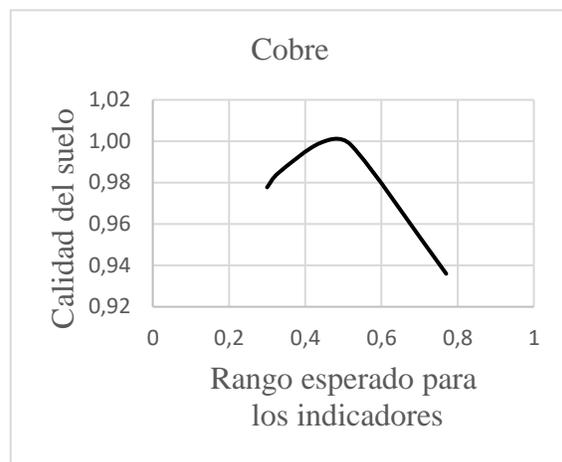
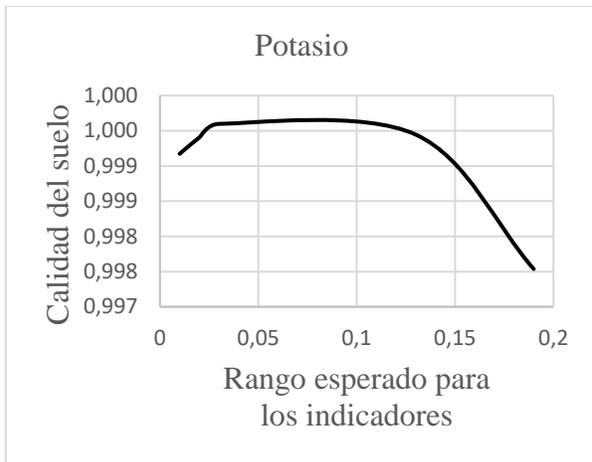


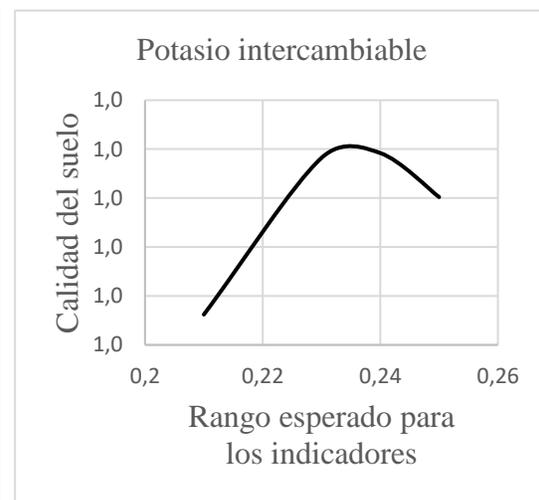
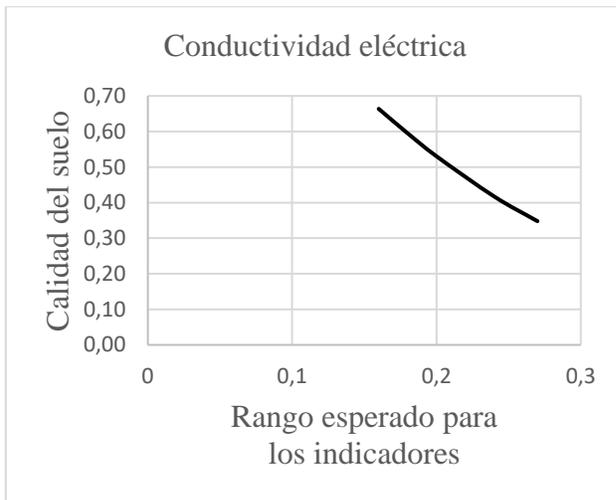
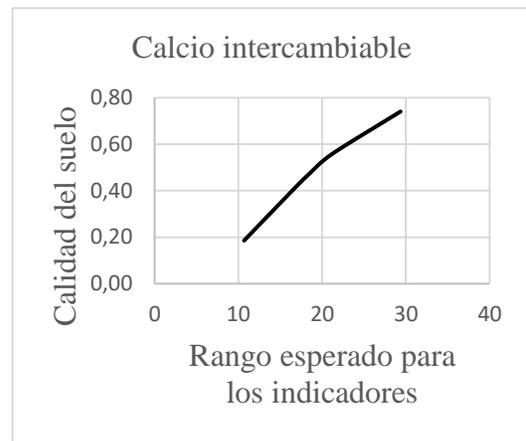
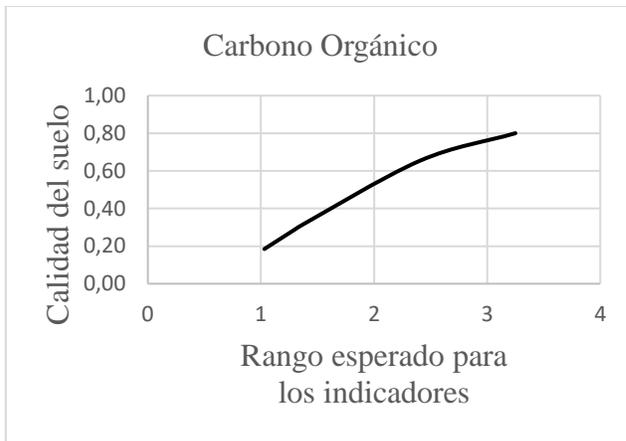




Cantón Gonzanamá







Anexo 3. Certificado de traducción del abstract



Loja, 7 de abril de 2025

Lcda. Ménessis Marloweth Castillo Pardo

Certified English Teacher

C E R T I F I C A:

Que el documento aquí compuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés, del resumen del trabajo de integración curricular, titulado: “Evaluación de sistemas agroforestales de café en ecosistemas de la provincia de Loja a través de los Índices de calidad del suelo (ICS) basados en servicios ecosistémicos”, el cual consta de doscientas setenta y ocho (278) palabras. El trabajo realizado es previo a la obtención del título de Ingeniera Ambiental, de la autoría de la estudiante Brenda del Cisne Guazha Romero, con cédula de identidad Nro. 1150662730, de la Universidad Nacional de Loja.

Lo certifica en honor a la verdad y autoriza a la interesada, hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.



Firmado electrónicamente por:
**MENESSIS MARLOWETH
CASTILLO PARDO**

Lcda. Ménessis Marloweth Castillo Pardo

LICENCIADA EN PEDAGOGÍA DEL IDIOMA INGLÉS

Número de registro: 1031-2023-2749324

C.I.: 1104246465