

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE**  
**SUELOS Y AGUA**



**CALIDAD DEL SUELO DE TRES GRADIENTES ALTITUDINALES CON**  
**SISTEMAS AGROFORESTALES DE *Coffea arabica* (CAFÉ) - *Inga macrophylla***  
**(PACAE) EN CHONTABAMBA, PERÚ**

**Tesis**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES, MENCIÓN:**  
**CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**

**PRESENTADO POR:**

**MARVIN GABRIEL GUISADO LALE**



**Tingo María - Perú**

**2024**



**ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 046-2024-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 22 de Enero de 2024, a horas 05:00 p.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“CALIDAD DEL SUELO DE TRES GRADIENTES ALTITUDINALES CON SISTEMAS AGROFORESTALES DE *Coffea arabica* (CAFÉ)- *Inga macrophylla* (PACAE) EN CHONTABAMBA, PERÚ”**

Presentado por el Bachiller **GUISADO LALE, Marvin Gabriel**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENA**”.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 18 de abril de 2024

**Dr. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO**  
**PRESIDENTE**

**Dr. NELINO FLORIDA ROFNER**  
**MIEMBRO**



**Ing. M. Sc. JOSE VICTOR QUIROZ RAMIREZ**  
**MIEMBRO**

**Ph. D. LUIS ALBERTO VALDIVIA ESPINOZA**  
**ASESOR**



“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 161 - 2024 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

### CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
CALIDAD DEL SUELO DE TRES GRADIENTES ALTITUDINALES CON SISTEMAS GROFORESTALES DE Coffea arabica (CAFÉ) - Inga macrophylla (PACAE) EN CHONTABAMBA, PERÚ	MARVIN GABRIEL GUISSADO LALE	<b>21 %</b> <b>Veintiuno</b>

Tingo María, 13 de mayo de 2024



Dr. Tomas Menacho Mallqui  
JEFE

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE**  
**SUELOS Y AGUA**



**CALIDAD DEL SUELO DE TRES GRADIENTES ALTITUDINALES CON**  
**SISTEMAS AGROFORESTALES DE *Coffea arabica* (CAFÉ) - *Inga macrophylla***  
**(PACAE) EN CHONTABAMBA, PERÚ**

- Autor** : Marvin Gabriel Guisado Lale.
- Asesor (es)** : Ph. D. Luis Alberto Valdivia Espinoza.
- Programa de investigación** : Ciencias Básicas.
- Línea de investigación** : Ecología y Conservación de Suelos.
- Eje temático** : Indicadores de la calidad del suelo.
- Lugar de ejecución** : Distrito Chontabamba, provincia Oxapampa, departamento Pasco.
- Duración** : 10 meses.
- Financiamiento** : Propio.

**Tingo María - Perú**

**2023**

## DEDICATORIA

Lleno de regocijo, amor y  
esperanza, dedico esta  
investigación a cada uno de mis  
seres queridos, quienes han sido  
mis pilares para seguir adelante;  
es para mí una gran satisfacción  
poder dedicarles, dado que con  
mucho esfuerzo, esmero y trabajo  
me lo he ganado.

A mis hermanos Dennis Iván  
Guisado Lale y Miguel José  
Guisado Lale; por constituir la  
razón de sentirme tan orgulloso de  
culminar una de mis metas.  
Gracias a ustedes por confiar  
siempre en mí.

A mis padres Gloria Lucía Lale  
Ortiz y Eliseo Guisado Gutiérrez;  
por ser la motivación de mi vida,  
mi orgullo de ser y lo que seré.

parte de mi vida y por permitirme  
ser parte de su orgullo.

Y sin dejar atrás a toda mi familia  
por confiar en mí, gracias por ser

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi principal agradecimiento la dirijo a Dios, quien me ha guiado y me ha  
dado la fortaleza y sabiduría para seguir adelante ante todas las  
adversidades.

A mi familia, por su comprensión y apoyo incondicional y constante a lo  
largo de mi vida universitaria.

## ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Hipótesis.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. General.....	3
1.2.2. Específicos.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Marco teórico.....	4
2.1.1. Suelos.....	4
2.1.2. Calidad de suelo.....	4
2.1.2.1. Evaluación de la calidad del suelo.....	6
2.1.2.2. Indicadores de la calidad del suelo.....	7
2.1.3. Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS).....	15
2.1.4. Descripción de las especies en estudio.....	15
2.1.4.1. <i>Inga macrophylla</i> Humboldt & Bonpland ex Willdenow	15
2.1.4.2. <i>Coffea arabica</i> L.	17
2.2. Estado del arte.....	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
3.1. Lugar de ejecución.....	23
3.1.1. Características de los sistemas agroforestales.....	24
3.1.2. Historia del suelo (abonamiento).....	24
3.1.3. Características climáticas.....	25
3.1.4. Características del distrito Chontabamba.....	25
3.2. Material y métodos.....	26
3.2.1. Materiales y equipos.....	26
3.2.1.1. Materiales de campo.....	26
3.2.1.2. Materiales de laboratorio.....	26
3.2.1.3. Equipos.....	26
3.2.2. Metodología.....	26
3.2.2.1. Indicadores fisicoquímicos del estado del recurso suelo para determinar su calidad en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	26
3.2.2.2. Calidad del suelo de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> , mediante la	

aplicación del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), como base para la gestión sostenible de los suelos.....	28
3.2.2.3. Relación entre el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) y la gradiente altitudinal con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	30
3.2.2.4. Tipo de investigación.....	31
3.2.2.5. Variables de la investigación.....	31
3.2.2.6. Diseño de investigación.....	31
3.2.2.7. Población y muestra.....	31
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1. Indicadores fisicoquímicos del estado del recurso suelo para determinar su calidad en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	32
4.2. Calidad del suelo de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> , mediante la aplicación del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), como base para la gestión sostenible de los suelos.....	42
4.2.1. Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 1 (1 831 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm).....	42
4.2.2. Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 2 (1 920 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm).....	43
4.2.3. Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 3 (2 046 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm).....	44
4.2.4. Calidad del suelo para la profundidad de 0 - 10 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente.....	44
4.2.5. Calidad del suelo para la profundidad de 10 - 40 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente.....	45
4.2.6. Calidad del suelo para la profundidad total de 0 - 40 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente.....	45
4.3. Relación entre el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) y la gradiente altitudinal con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	47
V. CONCLUSIONES.....	51

VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	52
VII. REFERENCIAS.....	53
ANEXOS.....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
13. Ubicación geográfica de las gradientes altitudinales con sistemas agroforestales....	23
14. Ubicación política de las gradientes altitudinales con sistemas agroforestales.....	23
15. Métodos de análisis de los indicadores fisicoquímicos del suelo.....	27
16. Parámetros edáficos, unidades de medida, valores máximos y mínimos definidos para evaluar el estado actual de los suelos.....	29
17. Rangos interpretativos del SUSS.....	30
18. Comparación de medias de los indicadores fisicoquímicos para las tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica - I. macrophylla</i> .....	33
19. Comparación de medias de los indicadores fisicoquímicos por profundidad en las tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica - I. macrophylla</i> .....	34
20. Correlación del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo con la gradiente altitudinal en diferentes profundidades del suelo.....	48
1. Propiedades físicas como indicadores de la calidad de los suelos.....	63
2. Propiedades químicas como indicadores de la calidad de los suelos.....	63
3. Rangos para la interpretación de la densidad aparente y el crecimiento radicular, basados en la textura del suelo.....	64
4. Rangos para la interpretación del pH (relación 2:1).....	64
5. Rangos interpretativos para la conductividad eléctrica (CE).....	65
6. Rangos interpretativos para el contenido de materia orgánica (%).....	65
7. Rangos para la interpretación del contenido de nitrógeno (N) total.....	65
8. Rangos para la interpretación del fósforo (P) disponible.....	65
9. Rangos para la interpretación del calcio (Ca) intercambiable.....	66
10. Rangos para la interpretación del magnesio (Mg) intercambiable.....	66
11. Rangos para la interpretación del sodio (Na) intercambiable.....	66
12. Rangos para la interpretación de la CIC.....	66
21. Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 1 <i>C. arabica - I. macrophylla</i> , profundidad de 0 - 10 cm, gradiente altitudinal 1 831 m s. n. m. ....	67
22. Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 1 <i>C. arabica - I. macrophylla</i> , profundidad de 10 - 40 cm,	

	gradiente altitudinal 1 831 m s. n. m. ....	67
23.	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 2 <i>C. arabica</i> – <i>I. macrophylla</i> , profundidad de 0 - 10 cm, gradiente altitudinal 1 920 m s. n. m. ....	67
24.	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 2 <i>C. arabica</i> – <i>I. macrophylla</i> , profundidad de 10 - 40 cm, gradiente altitudinal 1 920 m s. n. m. ....	67
25.	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 3 <i>C. arabica</i> – <i>I. macrophylla</i> , profundidad de 0 - 10 cm, gradiente altitudinal 2 046 m s. n. m. ....	67
26.	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 3 <i>C. arabica</i> – <i>I. macrophylla</i> , profundidad de 10 - 40 cm, gradiente altitudinal 2 046 m s. n. m. ....	67
27.	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 1 <i>C. arabica</i> – <i>I. macrophylla</i> , profundidad de 0 - 40 cm, gradiente altitudinal 1 831 m s. n. m. ....	68
28.	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 2 <i>C. arabica</i> – <i>I. macrophylla</i> , profundidad de 0 - 40 cm, gradiente altitudinal 1 920 m s. n. m. ....	68
29.	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 3 <i>C. arabica</i> – <i>I. macrophylla</i> , profundidad de 0 - 40 cm, gradiente altitudinal 2 046 m s. n. m. ....	68
30.	Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 1 (1 831 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm).....	69
31.	Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 2 (1 920 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm).....	69
32.	Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 3 (2 046 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm).....	69
33.	Calidad del suelo para la profundidad de 0 - 10 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente.....	69
34.	Calidad del suelo para la profundidad de 10 - 40 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente.....	70
35.	Calidad del suelo para la profundidad de 0 - 40 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente.....	70

36. Análisis de suelos para la gradiente altitudinal 1 (1 831 m s. n. m.).....71
37. Análisis de suelos para la gradiente altitudinal 2 (1 920 m s. n. m.).....72
38. Análisis de suelos para la gradiente altitudinal 3 (2 046 m s. n. m.).....73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama de muestreo de suelos para análisis fisicoquímico en cada uno de los sistemas agroforestales.....	27
2. Densidad aparente (Dap) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	35
3. Nivel de pH de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	35
4. Conductividad eléctrica (CE) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	36
5. Materia orgánica (MO) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	37
6. Nitrógeno (N) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	37
7. Fósforo (P) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	38
8. Calcio (Ca) intercambiable de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	38
9. Magnesio (Mg) intercambiable de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	39
10. Sodio (Na) intercambiable de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales.....	40
11. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	40
12. Calidad del suelo de la gradiente altitudinal 1: 1 831 m s. n. m. ....	43
13. Calidad del suelo de la gradiente altitudinal 2: 1 920 m s. n. m. ....	43
14. Calidad del suelo de la gradiente altitudinal 3: 2 046 m s. n. m. ....	44
15. Calidad del suelo a profundidad 0 - 10 cm, en las tres gradientes altitudinales.....	44
16. Calidad del suelo a profundidad 10 - 40 cm, en las tres gradientes altitudinales.....	45
17. Calidad del suelo a profundidad 0 - 40 cm, en las tres gradientes altitudinales.....	45
18. Distribución del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo en cada gradiente altitudinal para cada una de las tres profundidades del suelo.....	48
19. Apertura de calicata de 50x50x50 cm para muestrear suelos a 0-10 y 10-40 cm de profundidad, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.....	74

20.	Muestreando suelos con pala recta a 10 cm de profundidad, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.....	75
21.	Toma de lectura de las profundidades para el muestreo de suelos, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.....	76
22.	Toma y almacenamiento de la muestra de suelos a una profundidad de 0-10 cm, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.....	77
23.	Lectura de la profundidad para realizar el muestreo de suelos, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.....	77
24.	Lectura de la profundidad para realizar el muestreo de suelos, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen (1).....	78
25.	Lectura de la profundidad para realizar el muestreo de suelos, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen (2).....	79
26.	Sistema agroforestal <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> , sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.....	80
27.	Lectura de la profundidad para realizar el muestreo de suelos, sector Machicura, caserío Pusapno.....	80
28.	Apertura de calicata de 50x50x50 cm para muestrear suelos a 0-10 y 10-40 cm de profundidad, sector Machicura, caserío Pusapno.....	81
29.	Preparando el área superficial para el muestreo de suelos, sector Machicura, caserío Pusapno.....	81
30.	Sistema agroforestal <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> , sector Machicura, caserío Pusapno.....	82
31.	Entrega de las muestras de suelo al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.....	83
32.	Rotulado de las muestras de suelos recolectadas en los sistemas agroforestales evaluados.....	83
33.	Calibración de la espectrometría de absorción atómica, Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.....	84
34.	Cuantificación de la concentración de los micro y macroelementos químicos, Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.....	85
35.	Determinación de los macro y micronutrientes del suelo de los	

	sistemas agroforestales <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	85
36.	Determinando la textura de las muestras de suelo de los sistemas agroforestales <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> .....	86
37.	Determinación de los macro y micronutrientes del suelo de los sistemas agroforestales <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> (1).....	86
38.	Determinando el pH del suelo, Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.....	87
39.	Determinación de los macro y micronutrientes del suelo de los sistemas agroforestales <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> (2).....	87
40.	Determinación de los macro y micronutrientes del suelo de los sistemas agroforestales <i>C. arabica</i> - <i>I. macrophylla</i> (3).....	88

## RESUMEN

A nivel mundial la producción de alimentos depende del recurso suelo, el mismo que se encuentra condicionado por diversos factores ambientales y antrópicos, cuyas consecuencias son la pérdida de fertilidad y calidad. Los objetivos fueron: evaluar indicadores fisicoquímicos del suelo, determinar la calidad del suelo mediante el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), y determinar la relación entre el SUSS y las gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*. En cada sistema agroforestal se estableció 10 puntos de muestreo, extrayendo 20 muestras (0-10 y 10-40 cm) y 60 en los tres sistemas. Para comparar los indicadores fisicoquímicos de las tres gradientes altitudinales se aplicó un ANVA y se comparó las medias con la prueba Duncan, y con el fin de comparar los valores a diferentes profundidades, se realizó la prueba t. Para determinar la calidad del suelo en cada gradiente altitudinal, se utilizó el SUSS. Finalmente, a efectos de determinar la relación entre el SUSS y las gradientes altitudinales, se contrastaron hipótesis de no correlación y correlación. La mayoría de los indicadores fisicoquímicos evaluados en el suelo de las tres gradientes altitudinales muestran valores adecuados para altitudes y profundidades menores, a excepción del pH, P, Mg y CIC; la calidad del suelo determinada mediante el SUSS presenta un comportamiento inversamente proporcional a la profundidad y a las gradientes altitudinales; el suelo de la gradiente altitudinal 1 presenta calidad marginal y de las gradientes altitudinales 2 y 3 calidad pobre; no existe relación entre el SUSS y las gradientes altitudinales.

**Palabras clave:** indicadores fisicoquímicos, subíndice, profundidad del suelo, pobre, marginal.

## ABSTRACT

Worldwide, food production depends on the soil resource, which is influenced by various environmental and anthropogenic factors, whose consequences are the loss of fertility and quality. The objectives of present study were to evaluate physicochemical indicators of the soil, determine soil quality using the Sustainable Soil Use Subindex (SSUS), and determine the relationship between the SSUS and altitudinal gradients with agroforestry systems of *Coffea arabica* and *Inga macrophylla*. In each agroforestry system, that established 10 sampling points, extracting 20 soil samples at depths of 0-10 cm and 10-40 cm, resulting in a total of 60 samples across the three systems. To compare the physicochemical indicators among the three altitudinal gradients, applied an analysis of variance (ANOVA) and compared the means using the Duncan test; in addition, t tests were performed to compare values at different depths. The SSUS was used to assess soil quality within each altitudinal gradient. Finally, examined the relationship between the SSUS and altitudinal gradients by testing hypotheses of correlation and non-correlation. Most of the evaluated physicochemical indicators in the soil from the three altitudinal gradients showed suitable values for lower altitudes and depths, except for pH, P, Mg, and CIC; soil quality as determined by the SSUS showed an inversely proportional behavior with depth and altitudinal gradients; soil in altitudinal gradient 1 had marginal quality, while gradients 2 and 3 had poor quality; no significant relationship was found between the SSUS and altitudinal gradients.

**Keywords:** physicochemical indicators, subindex, soil depth, poor, marginal.

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la producción de alimentos depende del recurso suelo, el mismo que se encuentra condicionado por diversos factores ambientales como las sequías, desbordes de los ríos, heladas, etc. y antrópicos como el caso de la agricultura, expansión urbana, etc., cuyas consecuencias son la pérdida de fertilidad, compactación, salinización, entre otras, las mismas que disminuyen su capacidad para la producción agrícola.

Según Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015), el 33 por ciento de la superficie terrestre presenta suelos con moderada a alta degradación, como consecuencia de la erosión, salinización, compactación, acidificación y contaminación química.

Labores deficientes de planificación, gestión y uso idóneo de los suelos en el Perú, constituyen causas para la pérdida gradual de este importante recurso natural, proceso que se agrava con el avance del tiempo, en particular en suelos con vocación agrícola y ganadera. Sin embargo, el problema varía en cada región geográfica. Por ejemplo, en la costa se evidencia salinización del suelo, erosión eólica y desertificación; en la sierra y selva alta la erosión hídrica presenta altos niveles, así como el sobrepastoreo, tala y quema de bosques y pajonales; por su parte, en la selva baja, además de los problemas antes mencionados, se tienen la disminución de la fertilidad de los suelos producto de la pérdida de bosques. Así también, Berg (2013) argumenta que el suelo es muy vulnerable a la contaminación, con la consiguiente pérdida de sus propiedades; actúa, asimismo, como un tamiz a partir del cual se produce y regula el flujo de materia y energía, reteniendo así los contaminantes sedimentados o los trasladados por el agua.

El problema se agudiza con los cambios de uso de la tierra de áreas con barbecho a cultivos, los que colateralmente influyen en su estructura y disminuyen las reservas de la diversidad de nutrientes del suelo; asimismo, la ubicación topográfica que facilita procesos erosivos de origen hídrico y eólico posibilitan el incremento del coeficiente de escurrimiento, con lo que se afecta la función reguladora del flujo hídrico y perturba la calidad del suelo.

De la problemática antes enunciada, surge la interrogante ¿Cuál es la calidad del suelo de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla* en Chontabamba, Perú? Como es sabido, el suelo cumple la función de soporte para plantas y diversos organismos vivos, por lo que se constituye en uno de los factores con mayor importancia para el adecuado crecimiento y desarrollo de los cultivos agrícolas. Debe, por tanto,

ser reconocido como un sistema vivo y dinámico, que actúa mediante el principio del equilibrio y la interrelación de sus elementos físicos, químicos y biológicos.

En los últimos 20 años, en el Perú ha habido diversos esfuerzos de restauración de valiosas áreas de tierras con aptitud forestal que han sufrido degradación en diferentes regiones; en este contexto se han planteado alternativas para el uso de la tierra utilizando diversos enfoques de manejo y conservación del suelo (basados en el uso de fertilizantes y enmiendas) y la práctica de sistemas forestales, sistemas agroforestales y manejo de bosques secundarios o purmas. No obstante, estas iniciativas de restauración fueron mínimamente expandidas, habiéndose realizado muy poco para ser sistematizadas y evaluadas desde un punto de vista crítico, de tal manera que se pueda obtener lecciones y recomendaciones (Meza *et al.*, 2006).

En este sentido, los índices de calidad del suelo (ICS) constituyen instrumentos de medición que brindan información acerca de las características y procesos del suelo (Bremer y Ellert, 2004). Estos ICS son parámetros medibles que muestran cómo la productividad o rendimiento del suelo responde al medio ambiente y evidencian si la calidad del suelo está experimentando mejora, se mantiene igual o se encuentra en proceso de deterioro (Ghaemi *et al.*, 2014). Proporcionan, asimismo, información respecto a los efectos de los cambios en el uso de la tierra y las consecuencias de las labores agrícolas sobre las funciones o pérdida de fertilidad (Astier-Calderón *et al.*, 2002). Por su parte, Cantú *et al.* (2007) sostienen que no existen ICS idóneos para la totalidad de propósitos y contextos, sino que deben desarrollarse para cada caso en particular.

Por su parte, Ferreras *et al.* (2009) afirman que es fundamental realizar la estimación de la calidad de los suelos, dado que coadyuva a la sostenibilidad de los diversos sistemas productivos. Se infiere entonces, que los suelos que presentan calidad máxima ostentan la capacidad de conservar un alto rendimiento productivo causando mínimos niveles de deterioro del ambiente.

Pese a que el suelo es importante para la vida, no ha sido convenientemente valorado por la sociedad. Por consiguiente, urge el reto de preservar e incrementar su calidad; en tal sentido, mediante la presente investigación se pretende determinar la calidad del suelo en base a sus propiedades fisicoquímicas, en tres sistemas agroforestales localizados en tres gradientes altitudinales en Chontabamba, Perú.

### **1.1. Hipótesis**

- La calidad del suelo es diferente en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla* en Chontabamba, Perú.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. General

- Evaluar la calidad del suelo de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla* en Chontabamba, Perú.

### 1.2.2. Específicos

- Evaluar indicadores fisicoquímicos del estado del recurso suelo para determinar su calidad en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, en Chontabamba, Perú.
- Determinar la calidad del suelo de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla* en Chontabamba, Perú, mediante la aplicación del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), como base para la gestión sostenible de los suelos.
- Determinar la relación entre el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) y las gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, en Chontabamba, Perú.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Marco teórico

#### 2.1.1. Suelos

Los suelos son considerados como formaciones geológicas que se han desarrollado en diferentes condiciones climáticas y materiales básicos, lo que explica por qué continúan evolucionando y por qué existen tantas variedades. La forma en que se concibe el suelo varía según el enfoque que se tome en cuenta en su uso. El suelo, desde su origen, tiene como propósito principal sostener la vegetación, y en él deben darse las condiciones adecuadas para el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas (Navarro y Navarro, 2013).

Los suelos constituyen sistemas dinámicos y complejos donde se desarrollan procesos físicos, químicos y biológicos de magnitud variable; se encuentran en la capa superficial de la corteza terrestre, en forma de manto continuo (Ministerio de Agricultura [MINAG], 2011).

Aparte de cumplir la función de soporte y fuente de nutrientes para las plantas, de acuerdo con Labrador (2008), los suelos son también hábitats de una gran diversidad de organismos, albergando algunas de las comunidades bióticas más diversas del planeta. La dinámica del componente biótico del suelo garantiza la existencia de múltiples servicios ecosistémicos que en diferentes realidades ambientales proporciona a la biosfera en general.

Según Martin y Adad (2006), el suelo es uno de los recursos con mayor importancia para la vida, dado que constituye el cimiento imprescindible para la producción agrícola, pecuaria y forestal. Una cantidad considerable de suelos se utiliza para la producción de alimentos. Al respecto, Atlas y Bartha (2002) y Nannipieri *et al.* (2003) sostienen que el suelo es un sistema esencial, discontinuo y organizado formado por una combinación de materia orgánica, minerales y nutrientes que pueden sustentar el crecimiento de organismos vivos y microorganismos. Por su parte, Budhu (2007) refiere que la formación del suelo consiste en un complejo proceso que incluye transformaciones físicas, químicas y biológicas de la roca madre. Durante los procesos físicos las partículas se reducen de tamaño, sin sufrir alteración alguna en su composición, los que son causados por factores ambientales como el hielo, el deshielo y las lluvias; en los procesos químicos por su parte, las partículas minerales de las rocas son separadas, donde su alteración o destrucción y resíntesis a compuestos sólidos estables se producen, básicamente, debido a la actividad del agua, el oxígeno, el CO<sub>2</sub> y los componentes de origen orgánico.

#### 2.1.2. Calidad de suelo

Han pasado más de treinta años desde la introducción del concepto de calidad del suelo y su implementación, experimentando un mayor desarrollo y aceptación en los últimos veinte

años; desde entonces, su uso y concepto se encuentran en permanente desarrollo (Astier-Calderón *et al.*, 2002; Bastida *et al.*, 2008).

Consiste en una noción integral que considera al suelo como componente de un sistema productivo diversificado y, con propiedades físicas, químicas y biológicas que se pueden medir en periodos de tiempo específicos. Asimismo, reconoce cómo funcionan los suelos dentro de los sistemas agrícolas y sistemas naturales (Sánchez *et al.*, 2003).

Desde una perspectiva agrícola, se define a la calidad del suelo como la habilidad del mismo para tolerar la existencia de diversos cultivos sin degradarse ni dañar el ambiente natural (De la Rosa, 2008). A ella se vinculan diversas características físicas, químicas y biológicas o bioquímicas, siendo necesario, por consiguiente, seleccionar los parámetros más susceptibles a las variaciones suscitadas por el uso y actividades de manejo (Sánchez-Marañón *et al.*, 2002).

Puede definirse también, como la vocación de los suelos para cumplir funciones ecológicas, mantener la productividad biológica con calidad ambiental, coadyuvando a la salud de la flora y la fauna (Ochoa *et al.*, 2007). Dado que no es posible medirse de manera directa, la evaluación de la calidad de un suelo emplea índices o indicadores que se basan en determinados factores, características o procesos edáficos (García *et al.*, 2012).

Considerando la inexistencia de criterios universales para la evaluación de las variaciones en la calidad de los suelos (Jiménez y González-Quñones, 2006), gran cantidad de investigadores emplean suelos con vegetación natural o no alterados, como características referenciales para fijar indicadores (Duval *et al.*, 2016), debido a que refleja su condición ideal evidenciando equilibrio en el reciclaje de los nutrientes (Navarrete *et al.*, 2011).

En tal sentido, se considera a la función productiva del suelo como una importante característica cuando se determine su calidad (Gil-Sotres *et al.*, 2005).

Definiciones actuales de calidad se fundan en la multifuncionalidad de los suelos, más no en un solo tipo de uso específico (Singer y Ewing, 2000). Dada la multiplicidad de funciones que cumplen los suelos, tales como: producción; hidrológica; de almacenamiento de agua, nutrientes y energía; sostenibilidad y calidad ambiental; control de la contaminación; medio para la existencia de la vida; entre otras (Bautista *et al.*, 2004), se concluye que la calidad es relativa y no absoluta, constituyéndose, por tanto, en multifuncional (De la Rosa, 2008).

La calidad del suelo y sus características referenciales se interrelacionan con el concepto de funcionalidad de los ecosistemas, dado que integra e interconecta los componentes y procesos biológicos, químicos y físicos del suelo, en una circunstancia determinada (Astier-Calderón *et al.*, 2002).

Nortcliff (2002) por su parte, hace referencia a tres principios fundamentales en la

definición de la calidad del suelo:

- **La productividad del suelo**, referida a la capacidad del mismo para incentivar la productividad de los ecosistemas sin perder o afectar sus atributos físicos, químicos y biológicos.

- **La calidad del ambiente biofísico**, entendida como la capacidad de los suelos para disminuir la contaminación ambiental, los patógenos, y cualquier probable efecto negativo a los componentes externos del sistema, incluido los servicios ecosistémicos generados (sumidero de carbono, preservación de la diversidad biológica, recarga de acuíferos, etc.).

- **La salud del suelo**, referida a la capacidad de los suelos para generar alimentos sanos y nutritivos para consumo humano y de otros organismos.

En este contexto, los indicadores de calidad del suelo al no ser universales son seleccionados de acuerdo con el tipo de ambiente y suelo de cada zona en estudio (Cantú *et al.*, 2007).

#### **2.1.2.1. Evaluación de la calidad del suelo**

Evaluar la calidad de los suelos implica un proceso mediante el cual se trata de conocer la dinámica de sus diversas propiedades. Este conocimiento es efectivo para evaluar la sostenibilidad de las labores del manejo de los suelos; dicha evaluación debe tomar en consideración la organización de metas primordiales previa identificación de las funciones críticas de los suelos, lo cual permitirá elegir indicadores que generen información útil para monitorear los efectos del manejo sobre la funcionalidad de los suelos durante un lapso de tiempo (Gil-Sotres *et al.*, 2005).

Evaluar la calidad del suelo implica destacar lo importante que son las propiedades que son influenciadas por determinadas funciones del mismo. No obstante, se conoce que los indicadores de calidad deben mostrar las limitantes más importantes del suelo, en concordancia con las funciones básicas evaluadas (Bautista *et al.*, 2004). De lo antes mencionado, se desprende que los indicadores determinados para un sitio no necesariamente serían importantes para otro sitio.

Las características fisicoquímicas y biológicas del suelo, por lo general son utilizadas como indicadores. En tal sentido, Etchevers *et al.* (2009) refieren que los indicadores de calidad de los suelos deben reunir las siguientes condiciones:

- Que sean de fácil medición.
- Que midan las variaciones en las funciones de los suelos.
- Que consideren los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo.
- Que sean de fácil accesibilidad para los evaluadores y aplicables en campo.

- Que posean sensibilidad a las fluctuaciones climáticas y de manejo.

Etchevers *et al.* (2009) refieren por su parte, que los indicadores de calidad de los suelos deben permitir:

- Realizar un análisis del estado actual del suelo basado en la funcionalidad específica materia de evaluación.
- Identificar aspectos sensibles respecto a su sostenibilidad.
- Prever las consecuencias de una intervención y disminuirlas.
- Ser de ayuda para la toma de decisiones.

Precisa acotar entonces, que dependiendo del tipo de funcionalidad materia de estudio, las propiedades priorizadas para evaluar la calidad de los suelos pueden variar (Nortcliff, 2002; Etchevers *et al.* (2009). Se concluye entonces, que, como indicadores de calidad de suelo, pueden considerarse a las propiedades físicas, químicas y biológicas.

#### **2.1.2.2. Indicadores de la calidad del suelo**

Bautista *et al.* (2004) refieren que los indicadores que se utilicen deben evidenciar las limitantes más importantes del suelo, en relación con la función o las funciones primordiales que se evalúan, según lo sugiere por su parte, Astier-Calderón *et al.* (2002).

Asimismo, Doran y Zeiss (2000) y Volveré y Amézquita (2009), concuerdan en que los indicadores deben proponerse en un número limitado, ser versátiles para todo tipo de usuarios, ser sencillos y fáciles de medir, así como contar con un alto nivel de agregación. Es decir, deben ser propiedades que en resumen expresen diversas cualidades o propiedades; ser interdisciplinarios; y, en lo posible deben expresar una amplia variedad de situaciones. Por consiguiente, deben incluir diversas propiedades de los suelos (químicas, físicas, biológicas, etc.), poseer una variabilidad a través del tiempo de forma tal que posibilite realizar un seguimiento de las mismas, no deberán ser altamente sensibles a las variaciones climáticas pero la suficiente como para identificar las transformaciones producidas por el empleo y manejo de los recursos naturales.

Para la selección de indicadores de calidad se deben emplear criterios distintos y propios para cada uso del suelo y por ende, ser dinámicos a través del tiempo; es decir, la calidad del suelo debe evaluarse de acuerdo a sus funciones específicas, donde cada función es entendida como el producto de la interrelación de las diferentes propiedades del suelo, de tal forma que los mejores indicadores estarán constituidos por las propiedades que tengan influencia significativa sobre la capacidad que presentan los suelos para generar cada función, los usos de

los mismos y el ecosistema materia de evaluación (Astier-Calderón *et al.*, 2002).

De lo antes referido, se desprende que la evaluación da lugar a dos interrogantes primarias: ¿Cómo realiza el suelo esa función? y ¿Qué indicadores son idóneos para realizar la evaluación? En síntesis, existe marcado interés en contar con una cantidad reducida de indicadores que posibilite realizar la evaluación. Este grupo de indicadores es conocido como MDS, debido a sus siglas en inglés (minimum data set) (Etchevers *et al.*, 2009). No obstante, debido a la dificultad para evaluar un grupo de indicadores conocido como grupo de datos mínimos, cabe formularse la siguiente pregunta ¿qué indicadores podrían ser los más importantes? o ¿cuáles deben ser empleados en un proyecto propuesto?

En tal sentido, de lo antes indicado, se concluye que así se aplique cualquiera de las técnicas, el objetivo final de la selección de indicadores de calidad de los suelos, es que se constituyan en conocimiento valioso que permita evaluar el estado actual o determinar la variación de calidad a que están sujetos los suelos y que dichos indicadores contribuyan, mediante una adecuada selección, a la alerta temprana de los rumbos que puedan asumir determinadas características vitales de los suelos sujetos a diversos procesos de perturbación natural o antropogénica. Se concluye entonces, que es necesario definir con claridad el modelo de comparación que deberá emplearse como estándar, toda vez que podría influir en el resultado luego de analizar los indicadores, generando de esta manera, diferencias entre ellos (Etchevers *et al.*, 2009).

### **1. Indicadores físicos de la calidad del suelo**

Se cuenta con una gran cantidad de indicadores físicos de la calidad del suelo, que se ajustan acorde a las características predominantes de la zona en estudio. Nortcliff (2002) por su parte, sugiere a la textura, porosidad, densidad aparente y profundidad del suelo como indicadores físicos a ser estudiados.

Marcela *et al.* (2010) en investigaciones desarrolladas en conservación de suelos bajo cultivo agrícola en Misiones, Argentina, han determinado como indicadores de calidad a las siguientes propiedades del suelo: macro y microporos, densidad aparente, estabilidad de los agregados, materia orgánica, nitrógeno total, materia orgánica particulada, fósforo orgánico, capacidad de intercambio efectiva y actividad de la fosfatasa ácida.

Los indicadores físicos relacionados a la calidad de los suelos de uso agrícola se muestran en la **Tabla 1**.

## 2. Indicadores químicos de la calidad del suelo

Definir las funciones del suelo en procesos físicos, químicos y biológicos resulta frecuentemente problemático debido a su naturaleza dinámica e interdependiente. Algunos autores sostienen que los parámetros químicos y biológicos de la calidad de los suelos constituyen la misma propiedad, por lo que ambas categorías poseen gran importancia, como es el caso del N mineralizable, por citar un ejemplo.

La calidad de las aguas, la capacidad amortiguadora de los suelos y la disponibilidad de nutrientes para los vegetales se encuentran entre los parámetros químicos que se consideran indicadores de la relación suelo-planta (Etchevers *et al.*, 2009). Indicadores químicos como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) minimizan la ocurrencia de variaciones drásticas en el pH y la variación de la disponibilidad de nutrientes en los suelos (Astier-Calderón *et al.*, 2002).

Nortcliff (2002) propuso, asimismo, la idea de utilizar como indicadores químicos el pH, la conductividad eléctrica, la concentración de materia orgánica, la CIC y las proporciones de elementos con potencial nocivos como el aluminio y manganeso. Indica, además, que la alta variabilidad estacional que plantean los parámetros químicos como indicadores de la calidad de los suelos es un inconveniente importante a considerar.

Los indicadores que posibilitan la evaluación de la calidad química del suelo toman en cuenta los factores que alteran la relación suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, las reservas disponibles de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos (**Tabla 2**).

## 3. Indicadores biológicos de la calidad del suelo

Evaluar las propiedades biológicas del suelo es importante dado que mantiene estrecha relación con la descomposición de la materia orgánica proveniente de los residuos vegetales y animales, así como de su reciclaje, dado que los subproductos generados influyen de forma directa sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos (Astier-Calderón *et al.*, 2002).

## 4. Indicadores fisicoquímicos empleados en la determinación de la calidad del suelo del presente estudio

### - Densidad aparente (Dap)

Según Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2012), la densidad aparente es una característica utilizada para determinar la calidad de los suelos como un indicador para evaluar su estructura, así como la **resistencia mecánica y su cohesión. Las variaciones en la densidad aparente muestran** alteraciones en la

estructura del suelo, causadas por la relación que existe entre la densidad aparente y la cantidad de poros presentes. Esta propiedad influye en el crecimiento de los vegetales porque la resistencia de los suelos y su porosidad afectan el crecimiento de las raíces. Al aumentar la densidad aparente del suelo, se observa un aumento en la resistencia mecánica y una disminución en la porosidad, lo cual limita el crecimiento de las raíces a niveles críticos. La densidad aparente necesaria para el crecimiento de las raíces varía dependiendo de la textura de los suelos y las especies de plantas que se estén considerando.

Existen múltiples factores que influyen en los distintos valores que puede adquirir la densidad aparente del suelo, los mismos que están constituidos por la textura, proporción de materia orgánica y el manejo respectivo del suelo. Al contrario de la densidad real que se mantiene medianamente constante, la densidad aparente muestra una variabilidad considerable.

Por su parte, Mendoza (2011) refiere que la densidad aparente es un indicador del nivel de porosidad en los suelos y tiene relevancia en su manejo (dado que muestra la compactación y la adecuada circulación de agua y aire). Este indicador evidencia la forma en que se relaciona la densidad aparente y el porcentaje de porosidad, lo cual se puede ilustrar de la siguiente manera: 1 g/cm<sup>3</sup>: 63 %, 1,1 g/cm<sup>3</sup>: 59 %, 1,2 g/cm<sup>3</sup>: 56 %, 1,3 g/cm<sup>3</sup>: 52 %, 1,4 g/cm<sup>3</sup>: 48 %, 1,5 g/cm<sup>3</sup>: 45 %, 1,6 g/cm<sup>3</sup>: 41 %, 1,7 g/cm<sup>3</sup>: 37 %, 1,8 g/cm<sup>3</sup>: 33 %, 1,9 g/cm<sup>3</sup>: 30 %.

#### - pH

El potencial de hidrógeno, también llamado pH, es un factor que influye directamente en la capacidad de las plantas para absorber los nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo, así como en su solubilidad y disponibilidad. Algunos de los elementos que más influyen en el pH son el fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, zinc y cobre, así como el porcentaje de saturación de bases y la CIC. En zonas donde las precipitaciones son copiosas, se estimula el arrastre de los componentes del suelo, lo cual conduce a la acidificación del mismo (alcanzando un pH que varía entre 4,0 y 6,5), lo cual ocasiona la presencia de altas cantidades de Al y Mn solubles, que, al ser absorbidos por las raíces, causan envenenamiento y acumulación de fosfatos. En lugares secos, el lavado de los suelos es casi imperceptible y se produce alcalinización de los mismos, con un pH que varía entre 7,0 y 8,5; esto causa mínima solubilidad del fósforo, lo cual se debe a la presencia de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) (SAGARPA, 2012).

Los niveles de pH tienen un impacto significativo en el crecimiento y desarrollo de la vida vegetal y animal de los suelos, lo que lleva a una disminución de la actividad de bacterias y actinomicetos a valores de pH inferiores a 5,5 y a un aumento de su actividad en condiciones neutras. Debido a su mayor rango adaptativo, los hongos pueden adaptarse a una amplia gama de condiciones de pH. Las condiciones neutras favorecen el crecimiento de bacterias. El pH de

un suelo se puede utilizar para determinar los procesos biológicos que ocurren, como la nitrificación, la fijación biológica de N, la mineralización de la materia orgánica y la amonificación. Las plantas tienen requisitos genéticos únicos de pH para diferentes especies; no obstante, cuando los niveles de pH están por debajo de 4, las alteraciones del sistema radicular suelen ser el resultado de un daño directo ocasionado por el  $H^+$  (SAGARPA, 2012).

#### - Conductividad eléctrica (CE)

United States Department of Agriculture (USDA, 1999) refiere que el presente indicador expresa la proporción de sales contenidas en el suelo. La totalidad de suelos posee cantidades mínimas de sales, las mismas que son vitales para el crecimiento de los vegetales; no obstante, el equilibrio suelo-agua se ve alterado por un exceso de sales, lo cual restringe el crecimiento de las plantas. Los suelos que contienen exceso de sales surgen tanto de forma natural y como resultado de los usos y manejo a los que son sometidos. De igual forma, la CE expresa la cantidad de nutrientes disponibles para las plantas, siendo los iones típicamente relacionados con la salinidad:  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $H^+$  (cationes) o  $NO_3^-$ ,  $SO_4^-$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $OH^-$  (aniones).

SAGARPA (2012) sostiene, asimismo, que los efectos de la salinidad sobre los procesos fisiológicos de las plantas pueden ser de índole osmótica, nutritiva y tóxica. Las dos primeras constituyen consecuencias secundarias ocasionadas por el estrés salino, en tanto la toxicidad constituye una consecuencia primaria con incidencia directa de las sales. Contenidos elevados de  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Mg^{2+}$  o  $SO_4^{2-}$  hallados en ambientes salinos, podrían provocar déficits de iones esenciales, en especial  $K^+$ ,  $H_2PO_4^-$  o  $NO_3^-$ .

Los efectos tóxicos generados por el estrés primario pueden ser directos, de inmediata manifestación (minutos u horas) e identificados con daños a las membranas; o indirectos, dado que requieren mayor tiempo de exposición al estrés (días o semanas) a fin de que pueda desarrollarse y traducirse en el trastorno de los diferentes procesos metabólicos.

#### - Materia orgánica (MO)

La materia orgánica contenida en el suelo proviene de la descomposición de vegetales y animales y de las actividades biológicas de los seres vivos como microorganismos, mesofauna y macrofauna edáfica. La descomposición y transformación del componente vegetal y animal en los suelos es originada por una serie de procesos como la desintegración mecánica, oxidación, hidrólisis, etc., que actúan debido a la acción directa de las lluvias, las reacciones ácidas o básicas del suelo, de los vientos, de las variaciones de temperatura, entre otras.

Al descomponerse los residuos orgánicos se genera el humus, cuya constitución consta de un complejo de macromoléculas en estado coloidal compuesto por proteínas, azúcares, ácidos orgánicos, minerales, etc., que se encuentran en permanente degradación y síntesis.

Durante su descomposición, el humus da origen a moléculas coloidales que, unidas a minerales arcillosos, producen los complejos órgano-minerales. Estos coloides presentan carga negativa, lo cual les posibilita captar iones  $H^+$  y cationes metálicos ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$ ) y a la vez intercambiarlos constantemente de manera reversible. En su composición, el suelo contiene también ácido fúlvico como componente orgánico, el mismo que constituye un tipo de ácido húmico débilmente polimerizado.

La función con mayor importancia de la materia orgánica es estimular el crecimiento de las plantas a través de sus consecuencias en las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos. En el contexto nutricional los efectos pueden ser directos e indirectos respecto a la cantidad disponible de nutrientes para el crecimiento vegetal, particularmente en el aporte de N, P, S y ser generadora de energía para microorganismos que fijan N. Por otra parte, la función física consiste en promover una adecuada estructura de los suelos, mejorando, por consiguiente, la instalación de cultivos, circulación del aire y mantenimiento de la humedad, la estructura del suelo que disminuye la erosión e incrementa la capacidad amortiguadora (SAGARPA, 2012).

Entre el 20 y 70% de la capacidad de intercambio iónico del suelo es generada por sustancias de naturaleza húmica. Respecto a la función amortiguadora, el humus muestra capacidad de amortiguación para un extenso margen de valores de pH. Desde el punto de vista biológico, su función es activar a los organismos, dado que una cantidad apreciable de bacterias, actinomicetos y hongos en el suelo guardan relación en general, con el contenido húmico (SAGARPA, 2012).

Silva (2003) refiere que en la calidad del suelo el indicador con mayor importancia es la materia orgánica, constituyéndose en el constituyente más importante a ser seleccionado dentro de un conjunto de parámetros mínimos y de gran necesidad para determinar la calidad de los suelos. Indica, asimismo, que la materia orgánica de los suelos es vital a efectos de conservar su estructura, mantener el agua en cantidades necesarias, así como cumplir la función de reserva de nutrientes.

#### - **Nitrógeno (N) total**

SAGARPA (2012) manifiesta al respecto, que la atmósfera es la principal proveedora de N, donde se constituye en el gas más abundante. Este N atmosférico se vuelve utilizable por las plantas mediante el proceso de fijación biológica realizado por un grupo de microorganismos. Las mayores concentraciones de nitrógeno en el suelo se encuentran en forma de compuestos orgánicos, disponibles para los vegetales mediante el proceso de mineralización. Las reservas de nitrógeno en los suelos consisten en materia orgánica que se

descompone rápidamente, compuestos húmicos que se mineralizan más lentamente, en tanto una mínima cantidad se halla en forma inorgánica como  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ .

USDA (1999) por otra parte, sostiene que la concentración de nitrógeno en los suelos, en un momento determinado, depende de la velocidad en que los microorganismos realizan la descomposición de la materia orgánica; dicha velocidad está en función de la temperatura, humedad, aireación, tipo de restos orgánicos, pH y otros factores. Refiere, además, que una vez formados, los nitratos del suelo sufren procesos de lixiviación, fijación, desnitrificación y consumos por las plantas. Debido a ello, existe dificultad para la interpretación de los contenidos de N (nitratos) en lo referente a la cantidad y lugar donde se encontrará disponible a efectos de dar respuesta a los requerimientos de los cultivos.

#### - Fósforo (P) disponible

SAGARPA (2012) manifiesta que se trata de un elemento esencial hallado en forma de fosfatos y es fundamental para los vegetales; cumple función trascendental en el crecimiento y desarrollo de la diversidad genética. El referido elemento tiene escasa presencia en los suelos, más aún que una considerable cantidad no se encuentra en formas disponibles para los vegetales. La disponibilidad está en función de los tipos de suelo y de los niveles de solubilidad. Asimismo, para Bornemisza (1982) el fósforo presenta baja solubilidad, lo cual causa deficiencias en la disponibilidad de las plantas, quienes lo absorben como fosfatos provenientes del ácido fosfórico; la cantidad total de fósforo está en función, asimismo, de la proporción de materia orgánica presente en los suelos, dado que al incrementarse abundan los fosfatos orgánicos, obteniéndose mayores proporciones de fósforo disponible. La totalidad de fosfatos proviene del ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) y por lo general presenta dos formas: orgánicas e inorgánicas; el fósforo orgánico presenta la forma de fosfolípidos, ácidos nucleicos y fosfato de inositol; el fósforo inorgánico está básicamente representado por fosfatos de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , y  $\text{Mn}^{2+}$ , abundando en suelos ácidos. Estos suelos aparte de tener deficiencias en fósforo por naturaleza, cuentan con la particularidad de retenerlo o fijarlo en formas no solubles y por consiguiente, no asimilables por las plantas.

De los Ángeles (2007) sostiene que un suelo ácido (pH por debajo de 5) por lo general presenta baja proporción de fosforo disponible para las plantas, por lo que es necesario fertilizar con fósforo en cantidades elevadas. Al respecto, Huamani y Mansilla (1995) afirman que existe una baja proporción de fósforo disponible en suelos con pH bajos (ácidos), por lo que en conjunto con las elevadas precipitaciones pluviales, causa la precipitación del fósforo en fosfato insoluble de hierro y aluminio como consecuencia de su elevada reactividad.

### - Calcio (Ca) intercambiable

El calcio es uno de los cationes intercambiables que están directamente relacionados con el proceso de salinización y su impacto en la degradación del suelo, como lo afirma SAGARPA (2012). Sostiene, además, que la presencia de este elemento es bastante común en suelos semiáridos; no obstante, su baja solubilidad en formas químicas deriva en una limitada disponibilidad en la solución del suelo.

Los suelos con mayor precipitación pluvial pueden experimentar una reducción de las bases debido a la lixiviación y cosecha de cultivos, lo cual puede ocasionar una disminución del pH y falta de nutrientes para los cultivos.

El sodio en el suelo y las plantas, así como el calcio, moderan los cambios en los niveles de salinidad. En el contexto de la calidad del suelo, el calcio es vital en la consecución de una adecuada estructura de los suelos cuando abunda el complejo sorbente no ácido de los suelos o en el caso de que el aluminio se constituya en el elemento que predomina.

### - Magnesio (Mg) intercambiable

SAGARPA (2012) destaca la importancia de este componente ya que es un elemento clave en la estructura de la clorofila y, por ende, está directamente relacionado con el proceso de fotosíntesis. Es bastante frecuente observar carencias de magnesio en suelos arenosos que presentan una CIC baja. Además, en suelos que son ácidos, se encuentran niveles bajos de Mg.

### - Sodio (Na) intercambiable

De acuerdo con SAGARPA (2012), aunque no se ha comprobado que el Na sea un nutriente esencial, puede sustituir al potasio en determinadas situaciones. Existen diversas plantas que poseen mecanismos para disminuir la asimilación y transporte del sodio hacia el follaje, lo cual evita la manifestación de síntomas de toxicidad, toda vez que se concentra en los tallos, troncos y raíces de las plantas. Los indicios de una excesiva presencia de sodio en las hojas se manifiestan mediante la aparición de zonas muertas entre las venas. No obstante, un exceso de Na puede ocasionar una disminución de diversos cationes como el K, Ca y Mg.

### - Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Esta característica se establece como el límite máximo de cationes, incluyendo  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$ , que una determinada masa de suelo puede almacenar o intercambiar. La intensidad de la carga positiva es diferente para cada catión, lo cual hace posible que un catión pueda sustituir a otro en partículas de suelo con cargas negativas de origen coloidal, tanto orgánico como inorgánico. El fenómeno electrostático que ocurre en los coloides del suelo permite que retengan los iones presentes en la solución, manteniendo un equilibrio. De igual

forma, la materia orgánica aporta a la CIC de los suelos, sobre todo cuando se encuentra en una condición húmica elevada.

La CIC está ligada a la mejora de la estructura del suelo, lo cual beneficia a la circulación de aire, mantenimiento de la humedad, actividad de los microorganismos y fertilidad de los suelos. Por consiguiente, es esencial contar con una capacidad de intercambio catiónico de al menos  $7 \text{ Cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ , a fin de proteger de la lixiviación a la mayoría de los cationes (SAGARPA, 2012).

### 2.1.3. Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS)

SAGARPA ha estructurado durante el año 2012 una investigación como parte de la Línea de Base del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales. El estudio tuvo como fin proporcionar datos para orientar la implementación del programa y evaluar sus efectos en el futuro. La evaluación inicial del estado del suelo agrícola es una parte esencial del estudio antes referido, mediante el SUSS que se encarga de medir la calidad de los suelos mediante indicadores físicos y químicos.

En el estudio mencionado se explica cómo se estimó el SUSS, para cuyo efecto se recopilaron muestras en aproximadamente 4 000 parcelas de cultivo agrícola en México. Estas muestras se sometieron a análisis fisicoquímicos para evaluar la calidad del suelo. El subíndice fue creado utilizando la información obtenida de dichos análisis.

### 2.1.4. Descripción de las especies en estudio

#### 2.1.4.1. *Inga macrophylla* Humboldt & Bonpland ex Willdenow

1. **Familia:** FABACEAE (MIMOSOIDEAE)

2. **Nombres comunes:** “shimbillo”, “pacaé”

3. **Descripción**

Se describe un **árbol** con un diámetro que oscila entre 15 y 45 cm y una altura total de 6 a 20 m. Su fuste puede ser cilíndrico o irregular, y la ramificación comienza desde el segundo tercio. La base del fuste puede ser recta o presentar pequeñas raíces tabulares de hasta 0,5 m de altura. La **corteza externa** es lisa o lenticelada, de color gris pálido, con lenticelas circulares o alargadas dispuestas en hileras horizontales, especialmente abundantes hacia la zona basal del fuste. A menudo, se observan anillos horizontales en la corteza. La **corteza interna** es homogénea y de color amarillo-marrón, con un sutil aroma a legumbre. Las **ramitas terminales** tienen una sección angulosa y se vuelven de color marrón claro cuando están secas, con un diámetro de aproximadamente 6-12 mm, lisas y sin vellosidades. Las **hojas** son compuestas, paripinnadas, alternas y dispuestas en espiral. El peciolo mide entre 4 y 6 cm de longitud, y el raquis es anchamente alado, con alas de 1-2 cm de longitud. En el raquis, se encuentran

glándulas circulares de 2-3 mm de diámetro en la zona de inserción de los folíolos. Estos folíolos son 3-4 pares, elípticos, miden entre 15 y 25 cm de longitud y 6-10 cm de ancho, con bordes enteros. Los nervios secundarios están impresos en la superficie superior de las hojas. El ápice de los folíolos es agudo y acuminado, mientras que la base es obtusa o redondeada. Las hojas son glabras o presentan una fina y diminuta pubescencia de pelos simples en el envés. Las **inflorescencias** son axilares y a menudo se agrupan alrededor del ápice de la ramita. Cada inflorescencia tiene una longitud de 4-15 cm y las flores están dispuestas en una espiga congestionada, subtendida por brácteas deltoides de 0,5-1 cm de longitud. Las **flores** son hermafroditas, miden entre 6 y 10,5 cm de longitud y son actinomorfas. Tienen cáliz y corola presentes. El pedicelo mide 2-4 mm, el cáliz 1,5-2 cm con 5 dientes, y la corola es tubular y amarillenta, con 3,5-4 cm de longitud y también 5 dientes. En el exterior, la corola está densamente pubescente. El androceo tiene una longitud de 5,5-6,5 cm, con numerosos estambres fusionados justo por encima del nivel de la corola. El gineceo presenta un pistilo con ovario súpero y un estilo lineal y alargado, con un estigma apenas visible. Los **frutos** en cuestión son legumbres aplanadas, de un color amarillo verdoso, con dimensiones que oscilan entre 20 y 45 cm de longitud y 2,5 a 4,5 cm de ancho. Durante su juventud, estos frutos se mantienen erectos, y sus bordes presentan una característica alada. Además, su forma puede variar entre recta o ligeramente curvada. La superficie de estos frutos puede ser glabra o finamente pubescente.

**4. Distribución y hábitat.** Esta especie se encuentra en Brasil y la región amazónica de los países andinos (Ecuador, Colombia, Venezuela, Perú y Bolivia). Su hábitat principal abarca altitudes principalmente por debajo de los 1 000 metros sobre el nivel del mar. Se adapta a una variedad de condiciones climáticas: desde ambientes con alta y constante pluviosidad hasta zonas con marcadas estaciones secas. Es una planta heliófita, lo que significa que prospera en la luz solar directa. Además, se encuentra en bosques secundarios tempranos y tardíos y puede adaptarse a suelos con diferentes texturas y niveles de acidez, incluso aquellos que son pobres y mal drenados, a menudo con presencia de piedras.

**5. Usos.** Los frutos de esta planta contienen semillas envueltas en un tejido algodonoso, que son abundantes, comestibles y muy dulces. Estos frutos se comercializan y aprecian a nivel local. A pesar de su potencial, esta especie ha sido escasamente estudiada. Su madera, aunque común, no es muy duradera y se utiliza principalmente como leña. Además, contribuye a la recuperación de suelos degradados, ya que su crecimiento rápido aporta una gran cantidad de hojarasca y materia orgánica. En áreas donde la cubierta vegetal ha sido

devastada, esta planta es excelente para revegetar el suelo, facilitando el establecimiento posterior de árboles más exigentes en términos de calidad del suelo.

#### 2.1.4.2. *Coffea arabica* L.

1. **Familia:** RUBIACEAE

2. **Nombres comunes:** “café”, “cafeto”

#### 3. **Descripción**

En las plantas jóvenes de café, se desarrolla un sistema radicular con una **raíz principal** altamente ramificada, que prevalece sobre las **raíces secundarias**. En plantas adultas, se observa una **raíz pivotante central** que puede alcanzar una profundidad de entre 50 y 60 cm. De esta raíz pivotante se generan dos tipos de raíces: **axiales o profundas** que proporcionan estabilidad a la planta al anclarla al suelo, y **laterales** que crecen horizontalmente y dan origen a las **raicillas**, que absorben nutrientes de la solución del suelo. Alrededor del 80% de estas raicillas se encuentran confinadas a una profundidad de 0 a 30 cm (Arcila *et al.*, 2007). La planta consta por lo general de un único **tallo o eje central**, con nudos y entrenudos (Centro Nacional de Investigaciones de Café [CENICAFÉ], 2013). Existen dos tipos de brotes: ortotrópicos, cuyo crecimiento es vertical y constituyen el tallo principal y los chupones, y plagiotrópicos, que presentan crecimiento horizontal y están conformadas por las ramas primarias, secundarias y terciarias. Las **ramas laterales principales** se forman a partir de yemas en las axilas de las hojas del tallo principal. Estas ramas se extienden de manera continua y se desarrollan a medida que el eje central adquiere madurez. El crecimiento de estas ramas y el origen de nuevas **ramas laterales** en una disposición opuesta y escalonada dan como resultado una planta con forma cónica. Las ramas primarias, llamadas plagiotrópicas, generan otras **ramas secundarias y terciarias**, que suelen producir yemas vegetativas y, finalmente, flores y frutos a partir de estas yemas (Arcila *et al.*, 2007). Las **hojas** exhiben una disposición tanto opuesta como alterna en el tallo ortotrópico, mientras que en las ramas plagiotrópicas, su disposición es exclusivamente opuesta. El matiz de color de las hojas varía según la variedad, aunque generalmente se presentan en un tono verde oscuro y brillante en la superficie superior, mientras que en el envés son de un verde más claro. Las hojas jóvenes inicialmente muestran un color bronceado o verde claro, el mismo que evoluciona gradualmente hasta alcanzar su tonalidad definitiva (Rodríguez *et al.*, 2009). Las **flores** desempeñan un papel crucial al indicar la producción y distribución de la cosecha durante el año (CENICAFÉ, 2013). Estas flores se encuentran estratégicamente ubicadas en los nudos de las ramas, cerca de la base de las hojas, formando grupos de cuatro o más. La formación de las flores del cafeto se origina principalmente a partir de yemas seriadas, que se encuentran en las axilas foliares, presentes en los nudos de las ramas

plagiotrópicas y, en menor medida, en los nudos de los brotes ortotrópicos (Camayo-Vélez y Arcila-Pulgarín, 1996). Cada nudo de la planta presenta dos axilas foliares opuestas, y en cada una de estas axilas se desarrollan de tres a cuatro yemas. Cada yema está conectada a un tallo corto llamado pedúnculo, que a su vez presenta varios nudos donde se insertan dos diminutas hojas opuestas, conocidas como brácteas. En estas axilas, se forman aproximadamente cuatro botones florales. Este conjunto de flores agrupadas constituye la inflorescencia, también denominada glomérulo (Arcila, 2004). En resumen, cada nudo de la planta tiene el potencial de producir entre 24 y 32 flores, aunque esta cifra no es una regla estricta. Los **frutos** se presentan en forma de drupa, con una morfología globular u ovoide y un peciolo de longitud reducida, a los que comúnmente se les denomina cerezas (CENICAFÉ, 2013). Al madurar, estos frutos adquieren tonalidades rojas o amarillas y contienen dos semillas. En determinadas oportunidades, solo uno de los óvulos fecunda, dando lugar a una semilla de forma redonda conocida como café caracol (Rodríguez *et al.*, 2009). Las **semillas** presentan una forma oblonga y una superficie ligeramente convexa. Representan aproximadamente entre el 35% y el 38% del fruto del café y están compuestas por varias capas: el endocarpio o pergamino, una película plateada conocida como perisperma, y el endospermo cotiledón o embrión (Rodríguez *et al.*, 2009).

**4. Origen y distribución.** El génesis del café (*Coffea arabica* L.) se sitúa en las altiplanicies de Etiopía y Sudán (África), donde se localiza a más de 1 000 metros de altitud. Cercano al Lago Tana, entre los 12° y 15° de latitud norte, prospera en estado silvestre y semisilvestre, desplegando una rica diversidad de tipos que se han establecido en diversos países, constituyendo un tesoro invaluable y subexplotado de variabilidad genética, pudiendo ser aprovechado en sus variedades cultivadas. Todo apunta a que el cafeto fue un componente intrínseco de los bosques naturales, anidando en el sotobosque, para luego someterse a un proceso de domesticación<sup>1</sup> (IHCAFE, 2001).

Las regiones cafetaleras del mundo, estratégicamente ubicadas entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, se concentran en las dos franjas de menor latitud del planeta: la tropical y la subtropical (Pérez y Suárez, 2011).

## **2.2. Estado del arte**

Márquez *et al.* (2020) en una investigación llevada a cabo en Cusco, Perú, estudió la relación entre las características de los suelos y la altitud versus la calidad sensorial del café cultivado en sistemas agroforestales. Los resultados demostraron que el café tiende a desarrollarse más en suelos con un pH de 4,50 a 5,50, que son las condiciones óptimas para su

cultivo, tal como se mencionó previamente en un estudio realizado por Rosas *et al.* (2008); se observó que la presencia de este fenómeno ocurre con mayor regularidad en suelos con un pH de 4,16 a 4,49, los cuales son considerados extremadamente ácidos. También se evidenció una menor actividad en suelos con un pH de 5,60 a 7,29, donde el valor medio en el área de estudio fue de 5,29. Se puede notar también, que conforme se asciende en la cuenca donde se encuentran las fincas de café, el pH de los suelos va disminuyendo.

Cabon (2015) y Thériez (2015) determinaron por su parte, que en café plantado en áreas sombreadas con *Erythrina poeppigiana* en asocio con diferentes especies de sombra, se puede observar una notable preservación de una significativa cantidad de hojarasca y ramas en el suelo, comparativamente hablando respecto a los cafetales expuestos completamente al sol.

Para Rapidel *et al.* (2015), los árboles de sombra producen una cantidad considerable de material vegetal en descomposición, lo que puede ser una razón por la cual la evaporación del agua del suelo es menor en comparación con los suelos sin vegetación (expuestos al sol directo), hallazgo también corroborado por Lin (2010).

Márquez *et al.* (2020) al estudiar la relación entre los atributos del suelo y la altitud con la calidad sensorial del café producido en sistemas agroforestales en Cusco, Perú, descubrieron que, en términos generales, los suelos presentan una concentración considerablemente elevada de materia orgánica (MO) promedio (5.35%), lo cual según Hameed *et al.* (2020) es el resultado de la interacción de aspectos ecológicos, como la existencia de sistemas agroforestales con plantas de sombra, la acumulación de residuos de poda, deshierbe y otros elementos. También señala que con mayor frecuencia se encontraron niveles de materia orgánica entre 4 - 6%, siendo esta la responsable de suministrar nitrógeno y promover la presencia de organismos vivos en el suelo.

De acuerdo con Leblanc *et al.* (2007), la incorporación de especies que capturan nitrógeno del aire en un sistema agroforestal es beneficiosa para mantener un equilibrio adecuado de este elemento. Se estima que los cafetales poseen alrededor de 100 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno cuando se utilizan especies fijadoras como *Erythrina poeppigiana* o *Inga edulis* en condiciones normales de cultivo, lo cual según Nygren *et al.* (2012), puede variar desde 56 - 555 kg ha<sup>-1</sup>.

El nitrógeno tal como lo indica Arana (2003), se constituye en uno de los nutrientes más importantes para el cultivo del café y otras plantas en general. Por lo tanto, comprender su ciclo es esencial y necesario para asegurar la sostenibilidad de la producción. El único origen del nitrógeno es la materia orgánica y el nitrógeno presente en la atmósfera. La fuente principal del

nitrógeno orgánico del suelo es la materia orgánica presente, y constituye más del 80% del nitrógeno total del suelo, en contraste con el nitrógeno inorgánico, que representa entre el 2% y el 5% del nitrógeno total del suelo. De acuerdo con Andrianarisoa *et al.* (2009), se identificó que las plantas necesitan pasar por un proceso conocido como mineralización para poder utilizar el nitrógeno proveniente de la materia orgánica. Durante este proceso, el nitrógeno se transforma en nitrógeno inorgánico en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). El nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), otro tipo de nitrógeno inorgánico se forma a partir del amonio por medio del proceso de nitrificación, llevado a cabo por diferentes grupos de bacterias nitrificantes. Según Arana (2003), el amonio y el nitrato son elementos resultantes de la descomposición de minerales y del proceso de nitrificación, y pueden ser utilizados directamente por las plantas. Se sabe también, que las características fisicoquímicas del suelo, la temperatura, la humedad, el pH y la cantidad y calidad de la materia orgánica, influyen en los procesos de transformación del nitrógeno.

El uso de árboles de servicio según sostienen Rapidel *et al.* (2015), en América Latina constituye una práctica bastante generalizada en plantaciones de café medianamente intensivas. En estos sistemas, la variedad particular de especies es limitada a solo dos o tres, incluyendo el café. Las especies más comunes de árboles que crecen en condiciones de sombra incluyen *Erythrina spp.*, *Inga spp.*, y en menor medida, *Gliricidia sepium* y *Grevillea robusta*. Son tipos de plantas que habitualmente se encargan de captar nitrógeno (como las plantas de la subfamilia Mimosoideae o Faboideae), excepto por la especie *G. robusta*. Las plantas caducas, como los árboles de hoja ancha, tienen un crecimiento rápido y son capaces de soportar la poda anual o incluso varias veces al año. Algunas de las empresas generan leña de calidad alta o media, mientras que otras se dedican a la producción de frutas. Un ejemplo de plantas que producen tanto leña como frutas comestibles es *I. edulis*, mientras que otras plantas como la *Erythrina poeppigiana* no producen ninguno de estos dos productos. Estas plantas pueden propagarse fácilmente mediante estacas (en el caso de *Erythrina spp.*) o reproducirse mediante semillas (en el caso de *Inga spp.*).

Márquez *et al.* (2020) al investigar acerca de la relación entre las propiedades del suelo y la altitud con la calidad del café cultivado en sistemas agroforestales en Cusco, Perú, encontraron que la concentración promedio de fósforo disponible fue de 7,35 partes por millón (ppm), una cantidad considerada baja. Además, se observó que la mayoría de las muestras presentaron concentraciones de fósforo entre 2,1 y 10 ppm. También se notó un incremento progresivo de los niveles de fósforo en el suelo cuando el pH se encontraba en un estado neutro. La autora y sus colaboradores afirman, además, que a medida que la altitud aumenta, los niveles

de acidez cambiable también aumentan. Este aumento ocurre especialmente en condiciones de pH ácido, lo que afecta la fertilidad del suelo al incrementar la concentración de aluminio y permitir la pérdida de cationes a través de la lixiviación.

Los árboles ofrecen principalmente servicios destinados a la producción de café. Estos servicios incluyen protección contra las fluctuaciones extremas de temperatura, la liberación de fertilizante nitrogenado a través de los residuos de poda y la descomposición de los nódulos de las raíces después de la poda (Nygren y Ramírez, 1995). También contribuyen a mejorar la estructura superficial del suelo y reducir la escorrentía de las aguas de lluvia (Meylan, 2012), lo que a su vez ayuda a disminuir la erosión. Además, se ha señalado que la existencia de estos árboles contribuye a reducir la variabilidad de los rendimientos a lo largo de dos años y a prolongar la vida útil de las plantaciones de café (DaMatta, 2004). Se ha argumentado que la existencia de árboles de servicio otorga al sistema una mayor capacidad de adaptarse y recuperarse tanto en aspectos ecológicos como económicos. En el aspecto ecológico, cumpliendo la función de “buffer” de las variaciones en el ambiente, por ejemplo, la presencia última de la plaga de la roya mostró un comportamiento tendiente a una mayor capacidad de resiliencia ecológica en las plantaciones de café con presencia de sombra (Avelino *et al.*, 2015). En cuanto al componente económico, se busca reducir la dependencia de los cambios en los precios tanto del café como de los insumos utilizados, como los fertilizantes sintéticos (Herzog, 1994).

En términos generales, los árboles de sombra también pueden contribuir a prevenir la pérdida de nutrientes. Sobre este tema, Tully *et al.* (2012), (2013) han investigado el impacto de la cantidad de árboles en la liberación de nitrógeno en el suelo, así como el efecto de la diversidad de especies de árboles en la cantidad de nitrógeno lixiviado y concentrado en el suelo. En relación a ello, Tully *et al.* (2012) descubrieron que a medida que se incrementa la cantidad de árboles y, por lo tanto, su biomasa en el suelo, se reduce la pérdida de nitrógeno y fósforo en el suelo. Continuando, Tully *et al.* (2013) señalan que la utilización de fertilizantes de origen orgánico y la introducción de árboles en los predios agrícolas pueden disminuir las pérdidas de nutrientes en comparación con los predios que siguen prácticas convencionales con un solo cultivo. Estos investigadores descubrieron que los niveles de Nitrato ( $\text{NO}_3$ ) y fosfato ( $\text{PO}_4$ ) eran más altos en lixiviados provenientes de los suelos de cafetales sin cobertura arbórea de sombra, en comparación con el café cultivado en sistemas agroforestales (tanto orgánicos como convencionales).

Es esencial reconocer la importancia de evaluar la calidad del suelo, ya que un suelo con alta calidad ayuda a aumentar la productividad de los ecosistemas naturales y las

plantaciones forestales, así como a mejorar la calidad del agua y del aire, y también garantiza la salud de las personas (Gaia *et al.*, 2020). Hoy en día, algunas propiedades físicas y químicas del suelo son consideradas como indicadores de la calidad del mismo (Bai *et al.*, 2020).

Por su parte, Cantú *et al.* (2007) en un estudio realizado en Argentina, evaluaron la calidad de los suelos utilizando indicadores e índices. Los resultados revelaron que el C orgánico fue el indicador con el valor más bajo, en tanto la saturación de bases presentó el valor más alto. El pH y la densidad aparente mostraron valores medios, mientras que los otros indicadores tuvieron valores cercanos a 0,3.

La calidad del suelo disminuyó en un 82% en comparación con los suelos de referencia, según se observa en la reducción del valor del indicador C orgánico.

El pH mostró una calidad cercana a 0,6. Se pudo observar una reducción en el nivel de acidez en la capa superior de la mayoría de los suelos de la subunidad en comparación con los suelos de referencia.

En esta situación, el indicador también mostró ampliamente la condición de los terrenos locales. El indicador densidad aparente muestra que los suelos presentaban un grado moderado de compactación, toda vez que el promedio ponderado de la subunidad se ubicó entre los valores más bajos de los lugares de referencia y los más altos registrados en la región. El indicador espesor del horizonte A presentó una notoria reducción en comparación con los suelos de referencia, llegando a una disminución cercana al 70%. Esta situación se debe principalmente a la acción erosiva del agua, que ha sido evaluada en la región mediante la utilización de modelos y mediciones realizadas en el terreno.

El índice de calidad del suelo (ICS: 0,47) obtenido con este set mínimo de indicadores señala que el suelo se considera de moderada calidad. La subunidad fue fuertemente afectada por el manejo, lo cual tuvo un impacto significativo en el indicador C orgánico, lo que a su vez influyó considerablemente en el valor del ICS.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

La investigación se desarrolló en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* e *I. macrophylla*.

**Tabla 13.** Ubicación geográfica de las gradientes altitudinales con sistemas agroforestales.

Gradiente altitudinal (m s. n. m.)	Código del sistema	Propietario	Ubicación geográfica (UTM)		Altitud (m s. n. m.)
			Este	Norte	
			1 831	SAF <sub>1</sub>	
1 920	SAF <sub>2</sub>	Eliseo Guisado Gutierrez	448 875,71	8 836 424,23	1 920
2 046	SAF <sub>3</sub>	Jesús Colina Soto	450 545,72	8 834 300,53	2 046

**Tabla 14.** Ubicación política de las gradientes altitudinales con sistemas agroforestales.

Gradiente altitudinal (m s. n. m.)	Código del sistema	Ubicación política				Departamento
		Caserío/ Comunidad nativa	Sector	Distrito	Provincia	
1 831	SAF <sub>1</sub>	Caserío Pusapno	Machicura	Chontabamba	Oxapampa	Pasco
1 920	SAF <sub>2</sub>	Comunidad nativa Tsachopen	Gramazú	Chontabamba	Oxapampa	Pasco
2 046	SAF <sub>3</sub>	Comunidad nativa Tsachopen	Zipizu	Chontabamba	Oxapampa	Pasco

### 3.1.1. Características de los sistemas agroforestales

El sistema agroforestal 1 (SAF<sub>1</sub>) presenta una edad de 15 años, con aplicación de poda. Las plantas de *C. arabica* se encuentran instaladas a través del sistema de plantación curvas de nivel, con distanciamiento entre plantas de 2 x 1 m, con un total de 4 800 plantas por hectárea (ha). Los árboles de *I. macrophylla* han sido establecidos mediante el método cuadrado, con distanciamiento de 10 m entre plantas y un total de 100 árboles por ha.

Por su parte, el sistema agroforestal 2 (SAF<sub>2</sub>) posee una edad de 15 años, con práctica de poda. Las plantas de *C. arabica* se encuentran establecidas mediante el sistema de plantación curvas de nivel, con distanciamiento entre plantas de 2 x 1,20 m, con un total de 4 500 plantas por hectárea (ha). Los árboles de *I. macrophylla* se encuentran plantados mediante el método cuadrado, con distanciamiento entre plantas de 10 m y un total de 100 árboles por ha.

Finalmente, el sistema agroforestal 3 (SAF<sub>3</sub>) tiene una edad de 15 años, con aplicación de poda. Las plantas de *C. arabica* se encuentran establecidas a través del sistema de plantación curvas de nivel, con distanciamiento entre plantas de 2 x 1,30 m, con un total de 4 350 plantas por hectárea (ha). Los árboles de *I. macrophylla* fueron plantados a través del método cuadrado, con distanciamiento entre plantas de 10 m y un total de 100 árboles por ha.

### 3.1.2. Historia del suelo (abonamiento)

#### 3.1.2.1. Plan de abonamiento anual del SAF<sub>1</sub>, propiedad del Sr. Jaime Travi Ñahuairima

- **Tipo de abono:** Guano de isla, guano de corral, fertilizante sintético [N(12)-P(12)-K(12) + micronutrientes]. **Dosis:** 50 g/planta. **Mes de aplicación:** Marzo.

- **Tipo de abono:** Guano de isla, guano de corral, fertilizante sintético [N(12)-P(12)-K(06) + micronutrientes]. **Dosis:** 50 g/planta. **Mes de aplicación:** Noviembre.

#### 3.1.2.2. Plan de abonamiento anual del SAF<sub>2</sub>, de propiedad del Sr. Eliseo Guisado Gutierrez

- **Tipo de abono:** Guano de carnero, cal. **Dosis:** 250 g/planta. **Mes de aplicación:** Octubre - noviembre (la cal se aplica una vez cada dos años).

### **3.1.2.3. Plan de abonamiento anual del SAF<sub>3</sub>, de propiedad del Sr. Jesús Colina Soto**

- **Tipo de abono:** Guano de isla, fertilizante sintético [N(20)-P(20)-K(20) + micronutrientes], cal. **Dosis:** 250 g/planta. **Mes de aplicación:** Octubre - noviembre (la cal se aplica una vez cada dos años).

### **3.1.3. Características climáticas**

El distrito Chontabamba presenta una temperatura propia de climas de selva alta (templado húmedo), con temperatura mínima de 17 °C, media de 20,5 °C y máxima de 24 °C. La precipitación pluvial promedio es de 2 500 mm<sup>3</sup>, con una mínima de 2 000 mm<sup>3</sup> y máxima de 3 000 mm<sup>3</sup>. El periodo con mayor precipitación pluvial se presenta entre los meses de octubre a abril, incrementándose aún más en los meses de diciembre a febrero y disminuyendo gradualmente durante el periodo comprendido entre marzo hasta abril; esporádicamente las lluvias se extienden hasta el mes de mayo, llegando incluso a causar desbordes de los ríos, deslizamientos de tierra, etc. Los meses secos son los comprendidos entre junio y septiembre. Por otra parte, la humedad tiende a ser homogénea durante el año, fluctuando entre 70 y 90%, con un promedio de 80% (Municipalidad Distrital de Chontabamba, 2019).

### **3.1.4. Características del distrito Chontabamba**

El distrito Chontabamba ocupa dos subespacios naturales: sierra y selva; la capital del distrito y su población se localiza en mayor proporción en la parte de selva, debido a lo cual en determinados casos se considera al distrito como selva alta. Presenta una topografía medianamente plana en el sector Churumazu y dos niveles bien definidos en los sectores San Carlos, Nueva Berna, San José y Santo Domingo. Se encuentra entre cerros de gran altitud, que dan origen a relieves accidentados, siendo posible, por consiguiente, encontrar formaciones paisajísticas de colinas bajas y altas, pie de monte y paisaje de montañas. También existen tierras cuya capacidad de uso mayor es forestal. El distrito Chontabamba cuenta con una superficie de 36 496 hectáreas (Municipalidad Distrital de Chontabamba, 2019).

### 3.2. Material y métodos

#### 3.2.1. Materiales y equipos

##### 3.2.1.1. Materiales de campo

La distribución de los puntos de muestreo y toma de muestras de suelo para el análisis de sus propiedades físicas y químicas, se realizó empleando una pala recta, bolsas de polietileno, wincha de 50 metros, hilo rafia, balde de plástico con capacidad 5 L, etiquetas de papel, machete, martillo.

##### 3.2.1.2. Materiales de laboratorio

Para el análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo se empleó los siguientes materiales: tamiz de 5,2 y 0,25 mm de diámetro, hidrómetro o densímetro de Bouyoucos, cilindro graduado de 1 000 cm<sup>3</sup>, batidora, émbolo de agitación (varilla de cobre), pipeta, espátula, taras de aluminio, embudos de vidrio, fiolas o balón aforado de 100 cm<sup>3</sup> y 300 cm<sup>3</sup>, papel filtro Whatman N° 42, tubos de ensayo, pipeta volumétrica de 20 ó 25 cm<sup>3</sup>, vaso precipitado de 50 mL, buretas de 25 ml, pipetas volumétricas de 2 mL, tubos Klett, picetas, probeta de 200 y 1 000 mL, desecador de cristal, matraz.

##### 3.2.1.3. Equipos

GPS marca GARMIN Etrex modelo LEGEND HCx, estufa para secar el suelo a 105 - 110° C, balanza analítica a 0,1 g, conductímetro, cronómetro, pH metro, cámara digital marca SONY.

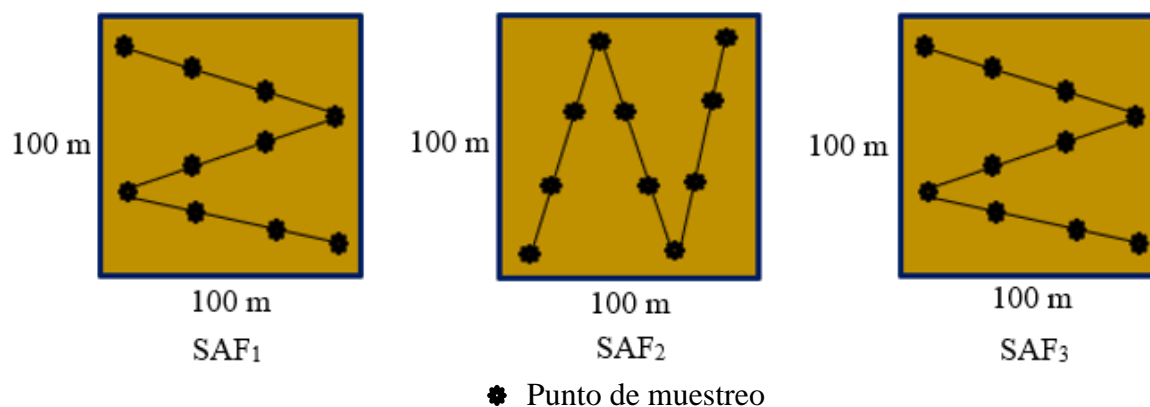
#### 3.2.2. Metodología

##### 3.2.2.1. Indicadores fisicoquímicos del estado del recurso suelo para determinar su calidad en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*

###### 1. Muestreo de suelos y análisis fisicoquímico

Para la evaluación de cada sistema agroforestal, respecto a la metodología de muestreo del suelo, se procedió según lo sugerido por Moscatelli *et al.* (2005) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA), en tanto la determinación de las propiedades fisicoquímicas se realizó de acuerdo a la metodología recomendada por USDA (1999) y Bazán (1996).

Cada sistema agroforestal estuvo constituido por una parcela de 1 ha, donde se establecieron diez puntos de muestreo; de cada uno de ellos se extrajo dos submuestras (0-10 y 10-40 cm de profundidad), obteniéndose 20 muestras de cada sistema agroforestal de 1 ha y un total de 60 muestras de los tres sistemas. Los puntos de muestreo fueron distribuidos en la totalidad del área de cada parcela, mediante un diseño en zeta (**Figura 1**). Cada una de las muestras fue colectada mediante una pala recta.



**Figura 1.** Diagrama de muestreo de suelos para análisis fisicoquímico en cada uno de los sistemas agroforestales.

Precisa acotar que previo a la toma de muestras, se procedió a retirar de la superficie todo material orgánico constituido por hojarasca, ramas o rastrojos de cosechas; abonos y contaminantes que podrían alterar los resultados del análisis fisicoquímico. Asimismo, se consideró no tomar muestras en áreas adyacentes a drenes o zonas inundadas, a la entrada de potreros o de construcciones y a sectores con presencia de residuos vegetales.

## 2. Indicadores (propiedades) del suelo analizados

Los indicadores y el método de análisis de las muestras de suelo se presentan en la **Tabla 15.**

**Tabla 15.** Métodos de análisis de los indicadores fisicoquímicos del suelo.

Indicador	Método de análisis
Densidad aparente (Dap)	De la probeta
pH	Relación agua-suelo 2:1
Conductividad eléctrica (CE)	Extracto de saturación
Materia orgánica (MO)	Walkley y Black
Nitrógeno (N) total	Digestión humedad y destilación Kjeldahl
Fósforo (P) disponible	Olsen o Bray, dependiendo del pH
Calcio (Ca) intercambiable	Acetato de Amonio pH 7,0; Absorción atómica o Flamometría
Magnesio (Mg) intercambiable	Acetato de Amonio pH 7,0; Absorción atómica o Flamometría
Sodio (Na) intercambiable	Acetato de Amonio pH 7,0; Absorción atómica o Flamometría
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Acetato de Amonio AS-12

Fuente: SAGARPA (2012).

Los análisis antes descritos fueron realizados en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

### 3. Técnicas estadísticas

A efectos de comparar los indicadores fisicoquímicos, se procedió a tabular una columna de categorías de profundidad de muestreo, para luego utilizar un análisis de la varianza debido a que se conformaron tres grupos de comparación; es decir, tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*. Posteriormente, se realizó la comparación de medias a través de la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95%, la cual permitió conocer las gradientes altitudinales cuyos suelos presentaban valores máximos y mínimos de los indicadores fisicoquímicos.

Asimismo, con la finalidad de comparar los valores de los indicadores fisicoquímicos a diferentes profundidades, se procedió a realizar una prueba t para grupos relacionados, debido a que las muestras de suelo se extrajeron a profundidades de 0 - 10 cm y 10 - 40 cm; este análisis se tuvo que realizar para cada una de las tres gradientes altitudinales. Los resultados se expresan mediante una tabla resumida de Duncan, la misma que contiene una codificación alfabética donde se indica la existencia o no, de diferencias estadísticas significativas entre los grupos comparados.

#### 3.2.2.2. Calidad del suelo de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, mediante la aplicación del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), como base para la gestión sostenible de los suelos

Para determinar la calidad del suelo para cada profundidad (0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total que comprende de 0 - 40 cm) en cada gradiente altitudinal, se utilizó el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) establecido por SAGARPA (2012), que agrupa las propiedades fisicoquímicas relacionadas a la calidad del suelo, a través del promedio de los valores normalizados de cada indicador edáfico (i).

$$SUSS = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Donde:

P : promedio del valor de los parámetros normalizados,

i : cada indicador o parámetro analizado, y

n : número total de parámetros analizados.

$$P = \frac{\sum_{j=1}^m R_{nj}}{m}$$

Donde:

R<sub>n</sub> : valor resultante del parámetro normalizado,

m : número de muestras de suelo analizadas, y

j : cada muestra de suelo.

La ecuación de cálculo de la normalización de los indicadores es:

$$Rn_j = 1 - \left( \frac{Vr_j - d_j}{c_j - d_j} \right)$$

Donde:

Rn : resultado normalizado,

Vr : valor del parámetro fisicoquímico (indicador),

d : valor deseable en el indicador,

c : valor de corte en el indicador, y

j : cada muestra de suelo.

Los rangos de los valores deseables y los valores de corte de cada indicador empleados en el cálculo del SUSS, se presentan en el **Tabla 16**.

**Tabla 16.** Parámetros edáficos, unidades de medida, valores máximos y mínimos definidos para evaluar el estado actual de los suelos.

Indicador	Unidad de medida	Rango o valor deseable (d)	Valor de corte (c)
Densidad aparente (Dap)	g/cm <sup>3</sup>	Dap < 1,1	1,47
pH	pH	6 < pH < 7	5 < pH < 8,5
Conductividad eléctrica (CE)	dS.m <sup>-1</sup>	CE < 1	4,1
Materia orgánica (MO)	%	MO > 5	0,5
Nitrógeno (N) total	%	N > 0,2	0,05
Fósforo (P) disponible	mg.kg <sup>-1</sup>	P > 5,5	0
Calcio (Ca) intercambiable	Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup>	Ca > 5	0
Magnesio (Mg) intercambiable	Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup>	Mg > 0,3	0
Sodio (Na) intercambiable	Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup>	Na < 1	1,5
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup>	CIC > 15	5

Fuente: SAGARPA (2012).

La interpretación del índice se realizó de acuerdo con la clasificación dada en la **Tabla 17**.

**Tabla 17.** Rangos interpretativos del SUSS.

<b>Calidad del suelo</b>	<b>Descripción</b>
Bueno ( $0,95 < \text{SUSS} \leq 1,0$ )	Las condiciones de calidad del suelo son las deseables para llevar a cabo la actividad agrícola.
Aceptable ( $0,80 < \text{SUSS} \leq 0,95$ )	La calidad del suelo está cercana a las condiciones deseables. Las variables analizadas poco se alejan de los valores adecuados.
Sensible ( $0,65 < \text{SUSS} \leq 0,78$ )	Los parámetros medidos ocasionalmente se alejan de los valores óptimos.
Marginal ( $0,45 < \text{SUSS} \leq 0,65$ )	Los indicadores de calidad son distantes de los valores deseables.
Pobre ( $0 < \text{SUSS} \leq 0,45$ )	La calidad del suelo para fines agrícolas se encuentra amenazada o afectada. Los indicadores se alejan completamente de los niveles deseables.

Fuente: SAGARPA (2012).

### **3.2.2.3. Relación entre el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) y la gradiente altitudinal con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla***

#### **1. Técnicas estadísticas**

Para el efecto, se procedió a agrupar los valores del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) por profundidades de muestreo (0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total de 0 - 40 cm); asimismo, se añadió otra columna donde no fueron consideradas las profundidades, analizando solamente los casos. A estas columnas se adicionó otra, conteniendo los valores de cada gradiente altitudinal (1 831, 1 920 y 2046 m s. n. m.).

Luego, los datos fueron exportados al paquete estadístico SPSS v. 28 (versión prueba), en donde se accedió a las opciones analizar, correlacionar y bivariadas, y se adicionó las variables a correlacionar. De ello se obtuvo una tabla donde se aplicó la correlación de Pearson a un nivel de confianza del 95%, cuyos valores muestran el número de casos por cada variable, el grado de correlación y la significancia bilateral.

Las hipótesis que se contrastaron para las muestras de suelos a profundidad de 0 - 10 cm, estuvieron constituidas por:

H<sub>0</sub>: El valor del SUSS a una profundidad de muestreo de 0 - 10 cm y la gradiente altitudinal no están correlacionadas.

H<sub>1</sub>: El valor del SUSS a una profundidad de muestreo de 0 - 10 cm y la gradiente altitudinal están correlacionadas.

Para el caso de la profundidad de muestreo de 10 - 40 cm, las hipótesis contrastadas fueron:

H<sub>0</sub>: El valor del SUSS a una profundidad de muestreo de 10 - 40 cm y la gradiente altitudinal no están correlacionadas.

H<sub>1</sub>: El valor del SUSS a una profundidad de muestreo de 10 - 40 cm y la gradiente altitudinal están correlacionadas.

Finalmente, se ha promediado ambas profundidades, obteniendo valores para la profundidad de 0 - 40 cm, donde se contrastaron las siguientes hipótesis:

H<sub>0</sub>: El valor del SUSS a una profundidad de muestreo de 0 - 40 cm y la gradiente altitudinal no están correlacionadas.

H<sub>1</sub>: El valor del SUSS a una profundidad de muestreo de 0 - 40 cm y la gradiente altitudinal están correlacionadas.

La interpretación de la existencia o ausencia de correlación, así como del grado de correlación estuvo basado en los ejemplos expresados por Hernández *et al.* (2014).

#### **3.2.2.4. Tipo de investigación**

La investigación es de tipo aplicada, descriptiva, cuantitativa y no experimental.

#### **3.2.2.5. Variables de la investigación**

- Calidad del suelo (Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS)) en las tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.
- Gradientes altitudinales: 1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.

#### **3.2.2.6. Diseño de investigación**

Diseño no experimental, toda vez que no existió manipulación deliberada de la variable, dado que se realizó una descripción de las características físicas y químicas del suelo; no obstante, se trató de contrastar el efecto de procesos causales que ya ocurrieron.

#### **3.2.2.7. Población y muestra**

La población estuvo constituida por tres sistemas agroforestales, cada uno de 1,0 ha de extensión; debido a que se trata de una población pequeña, no existió la necesidad de definir un tamaño de muestra, razón por la que se trabajó con la totalidad de unidades de investigación.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Indicadores fisicoquímicos del estado del recurso suelo para determinar su calidad en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*

La mayoría de los indicadores fisicoquímicos del suelo muestran valores diferentes en cada gradiente altitudinal con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, a excepción de la densidad aparente y la conductividad eléctrica, cuyos valores fueron similares tanto a la profundidad de 0 - 10 cm y de 10 - 40 cm, respectivamente (**Tabla 18**).

Al respecto, Drury *et al.* (2003) sostienen que, la densidad aparente óptima para el desarrollo de raíces en suelos con textura fina oscila entre 0,8 a 1,2 g.cm<sup>-3</sup>; se desprende entonces, que los resultados de la presente investigación se encuentran dentro de los antes mencionados, dado que van desde 1,08 hasta 1,15 g/cm<sup>3</sup>, lo cual resulta concordante. Indican, asimismo los autores antes referidos, que las raíces pueden drásticamente dejar de crecer en suelos cuya densidad aparente sea superior a 1,5 Mg.m<sup>-3</sup>, encontrándose los resultados del presente estudio, por debajo de dicho valor, por lo que puede deducirse que las raíces de las plantas van a tener un crecimiento normal.

Para Pinzón (2010) por su parte, la densidad aparente del suelo varía considerablemente tanto en dirección vertical como horizontal dentro del perfil del suelo. También se observan variaciones temporales, particularmente en los primeros centímetros del suelo. Se plantea, por consiguiente, la dificultad de determinar valores ideales para los suelos sin considerar también, el desarrollo de las plantas.

De acuerdo con Mogollón (2012), se ha establecido que la densidad aparente (Da) es un factor que señala la existencia de áreas donde el suelo se encuentra endurecido y compactado, dado que la disminución del espacio poroso en el suelo resulta en un incremento de los valores de la densidad aparente.

Respecto a la conductividad eléctrica (CE), Barbaro *et al.* (2018) sostienen que, mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato. Indican, asimismo, que la CE mide la capacidad que posee un material para transportar la corriente eléctrica; dicho valor será más alto cuando la corriente a través del mismo se mueva con mayor facilidad. En síntesis, significa que, a mayor CE, mayor será la concentración de sales, por lo que es recomendable que la CE de los sustratos sea baja; es decir, de preferencia debe ser menor a 1 dS.m<sup>-1</sup>, toda vez que una CE baja optimiza el manejo de la fertilización, evitándose inconvenientes como producto de la fitotoxicidad de los cultivos.

Añaden, además, que, durante el desarrollo del cultivo, la CE de los sustratos podría incrementarse debido a: 1) Presencia de fertilizantes no solubles, como los de liberación lenta.

2) Incorporación de una cantidad de fertilizante superior a las absorbidas o lixiviadas. 3) La capacidad de intercambio catiónico del sustrato es elevada, y a su vez se descompone para liberar nutrientes. Se puede evitar todo esto si se sabe de antemano la cantidad de nutrientes que el cultivo necesita. Finalizan los expertos señalando que la reacción de la planta frente a una alta conductividad eléctrica dependerá de factores como la edad de la planta, las condiciones del entorno, el manejo de los cultivos y las características propias de la especie. Una plántula en una bandeja alveolada es más delicada en comparación con una planta más desarrollada, mientras que una planta en un entorno fresco y húmedo enfrenta mejor la salinidad en comparación con una que se cultiva en un ambiente cálido y seco.

Por su parte, USDA (2011) refiere que la CE mide la habilidad de la solución suelo para transportar la corriente eléctrica y que la concentración de iones determina la CE del suelo, por lo cual, en la agricultura, es utilizada como medida de salinidad del suelo.

Padilla (2002) sostiene, además, que cuanto mayor es la concentración de sales en una solución del suelo, mayor es la corriente eléctrica que puede ser transmitida mediante ella. Debido a ello es que la CE se constituye en indicador de la salinidad del suelo. De por sí, el agua pura no es buena conductora de la electricidad, en tanto el agua con contenido de sales en solución puede conducir corriente de manera proporcional a la cantidad de sales disueltas.

En este contexto, Allaire *et al.* (2012) afirman que esta propiedad está íntimamente asociada con la salinidad del suelo y el estimarla y predecirla constituye especial interés científico para nuevas aplicaciones agrícolas o ambientales.

**Tabla 18.** Comparación de medias de los indicadores fisicoquímicos para las tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

Elementos	Profundidad (0 - 10 cm)			Profundidad (10 - 40 cm)		
	Grad. alt. 1	Grad. alt. 2	Grad. alt. 3	Grad. alt. 1	Grad. alt. 2	Grad. alt. 3
Dap (g/cm <sup>3</sup> )	1,13 <sup>a</sup>	1,15 <sup>a</sup>	1,13 <sup>a</sup>	1,08 <sup>b</sup>	1,11 <sup>a</sup>	1,08 <sup>b</sup>
pH	6,11 <sup>a</sup>	4,43 <sup>c</sup>	4,87 <sup>b</sup>	6,38 <sup>a</sup>	4,62 <sup>c</sup>	4,85 <sup>b</sup>
CE (dS.m <sup>-1</sup> )	0,19 <sup>b</sup>	0,25 <sup>a</sup>	0,14 <sup>b</sup>	0,12 <sup>a</sup>	0,13 <sup>a</sup>	0,07 <sup>a</sup>
MO (%)	1,93 <sup>b</sup>	2,57 <sup>a</sup>	1,78 <sup>b</sup>	0,69 <sup>b</sup>	1,37 <sup>a</sup>	0,79 <sup>b</sup>
N (%)	0,10 <sup>b</sup>	0,13 <sup>a</sup>	0,09 <sup>b</sup>	0,03 <sup>b</sup>	0,07 <sup>a</sup>	0,04 <sup>b</sup>
P (mg.kg <sup>-1</sup> )	6,20 <sup>a</sup>	7,31 <sup>a</sup>	6,36 <sup>a</sup>	2,69 <sup>b</sup>	4,63 <sup>a</sup>	3,79 <sup>ab</sup>
Ca (Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )	6,89 <sup>a</sup>	1,94 <sup>c</sup>	3,40 <sup>b</sup>	5,54 <sup>a</sup>	1,16 <sup>b</sup>	1,65 <sup>b</sup>
Mg (Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )	0,98 <sup>a</sup>	0,23 <sup>c</sup>	0,46 <sup>b</sup>	0,85 <sup>a</sup>	0,13 <sup>b</sup>	0,19 <sup>b</sup>
Na (Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )	0,07 <sup>a</sup>	0,02 <sup>b</sup>	0,06 <sup>a</sup>	0,06 <sup>a</sup>	0,01 <sup>b</sup>	0,05 <sup>a</sup>
CIC (Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )	9,19 <sup>a</sup>	4,40 <sup>c</sup>	5,49 <sup>b</sup>	7,34 <sup>a</sup>	2,92 <sup>b</sup>	3,57 <sup>b</sup>

Letras diferentes demuestran significancia estadística.

Mayores valores de los indicadores fisicoquímicos se registraron en las muestras de suelo obtenidas a una profundidad de 0 - 10 cm, en comparación con las muestras de suelo extraídas a profundidad de 10 - 40 cm (**Tabla 19**).

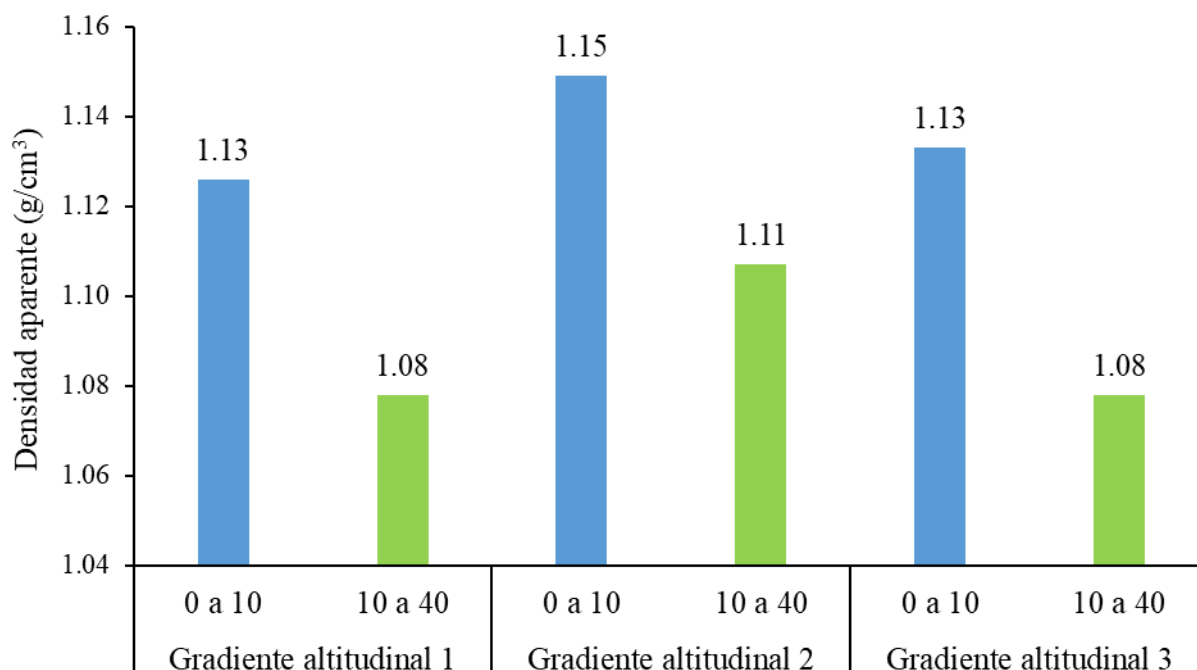
**Tabla 19.** Comparación de medias de los indicadores fisicoquímicos por profundidad en las tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

Elementos	Gradiente altitudinal 1		Gradiente altitudinal 2		Gradiente altitudinal 3	
	0 - 10 cm	10 - 40 cm	0 - 10 cm	10 - 40 cm	0 - 10 cm	10 - 40 cm
Dap (g/cm <sup>3</sup> )	1,13 <sup>a</sup>	1,08 <sup>a</sup>	1,15 <sup>a</sup>	1,11 <sup>b</sup>	1,13 <sup>a</sup>	1,08 <sup>b</sup>
pH	6,11 <sup>a</sup>	6,38 <sup>a</sup>	4,43 <sup>b</sup>	4,62 <sup>b</sup>	4,87 <sup>a</sup>	4,85 <sup>a</sup>
CE (dS.m <sup>-1</sup> )	0,19 <sup>a</sup>	0,12 <sup>a</sup>	0,25 <sup>a</sup>	0,13 <sup>b</sup>	0,14 <sup>a</sup>	0,07 <sup>b</sup>
MO (%)	1,93 <sup>a</sup>	0,69 <sup>b</sup>	2,57 <sup>a</sup>	1,37 <sup>b</sup>	1,78 <sup>a</sup>	0,79 <sup>b</sup>
N (%)	0,10 <sup>a</sup>	0,03 <sup>b</sup>	0,13 <sup>a</sup>	0,07 <sup>b</sup>	0,09 <sup>a</sup>	0,04 <sup>b</sup>
P (mg.kg <sup>-1</sup> )	6,20 <sup>a</sup>	2,69 <sup>b</sup>	7,31 <sup>a</sup>	4,63 <sup>b</sup>	6,36 <sup>a</sup>	3,79 <sup>b</sup>
Ca (Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )	6,89 <sup>a</sup>	5,54 <sup>b</sup>	1,94 <sup>a</sup>	1,16 <sup>b</sup>	3,40 <sup>a</sup>	1,65 <sup>b</sup>
Mg (Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )	0,98 <sup>a</sup>	0,85 <sup>b</sup>	0,23 <sup>a</sup>	0,13 <sup>b</sup>	0,46 <sup>a</sup>	0,19 <sup>b</sup>
Na (Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )	0,07 <sup>a</sup>	0,06 <sup>b</sup>	0,02 <sup>b</sup>	0,01 <sup>a</sup>	0,06 <sup>a</sup>	0,05 <sup>b</sup>
CIC (Cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )	9,19 <sup>a</sup>	7,34 <sup>b</sup>	4,40 <sup>a</sup>	2,92 <sup>b</sup>	5,49 <sup>a</sup>	3,57 <sup>b</sup>

Letras diferentes demuestran significancia estadística.

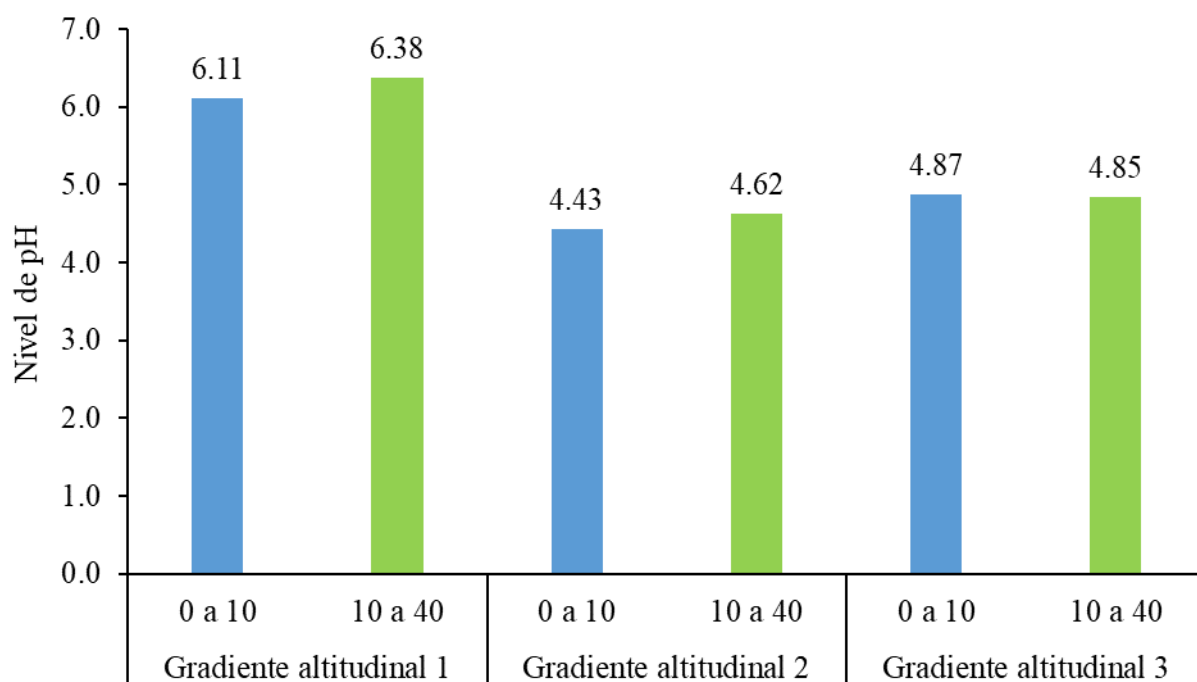
Los valores promedios de los 10 indicadores fisicoquímicos determinados por profundidad de muestreo y gradiente altitudinal se muestran desde la **Figura 2** hasta la **Figura 11**. Estos indicadores fueron inicialmente caracterizados a fin de posteriormente, determinar la calidad de los suelos mediante la aplicación del SUSS.

Según SAGARPA (2012), la Dap del suelo se clasifica entre ideal y aceptable para las profundidades 0 - 10 y 10 - 40 cm, en las tres gradientes altitudinales. Se observa una relación directamente proporcional con la altitud hasta la gradiente altitudinal 2 e inversamente proporcional con la profundidad del suelo (**Figura 2**).



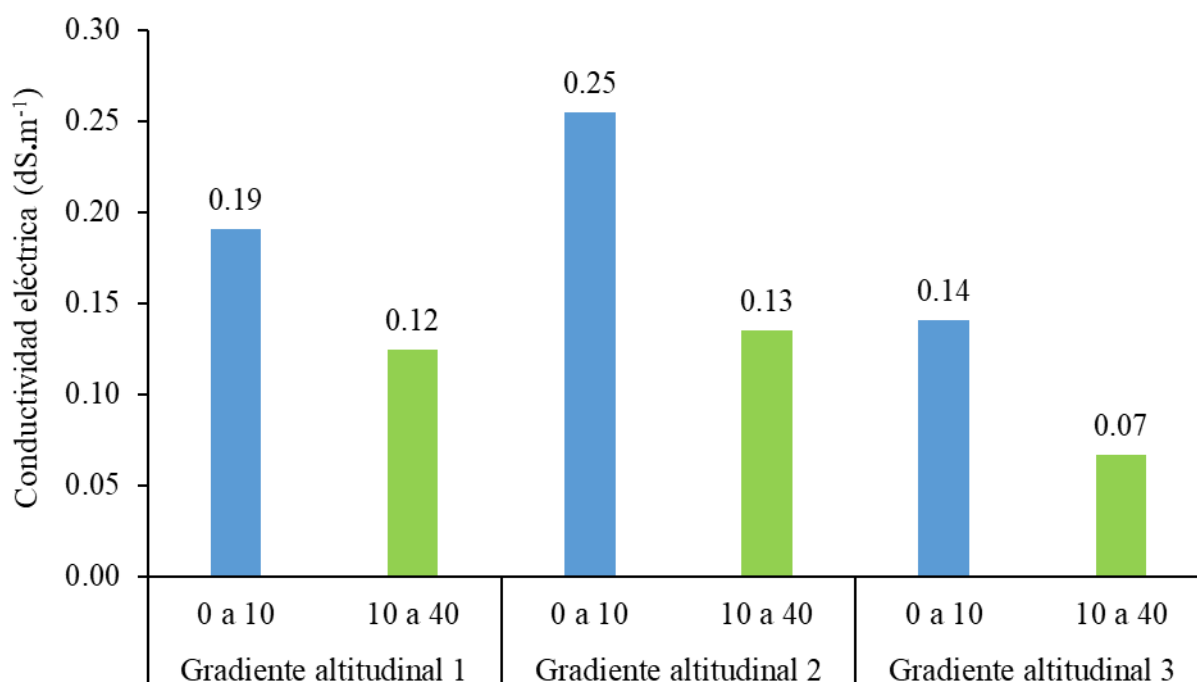
**Figura 2.** Densidad aparente (Dap) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

De acuerdo con SAGARPA (2012), el pH del suelo se clasifica entre fuertemente ácido y moderadamente ácido para ambas profundidades, en las tres gradientes altitudinales. La tendencia indica que hacia la gradiente altitudinal 2 la acidez de los suelos se incrementa; no obstante, a mayor profundidad la acidez disminuye hasta la gradiente altitudinal 2 (**Figura 3**).



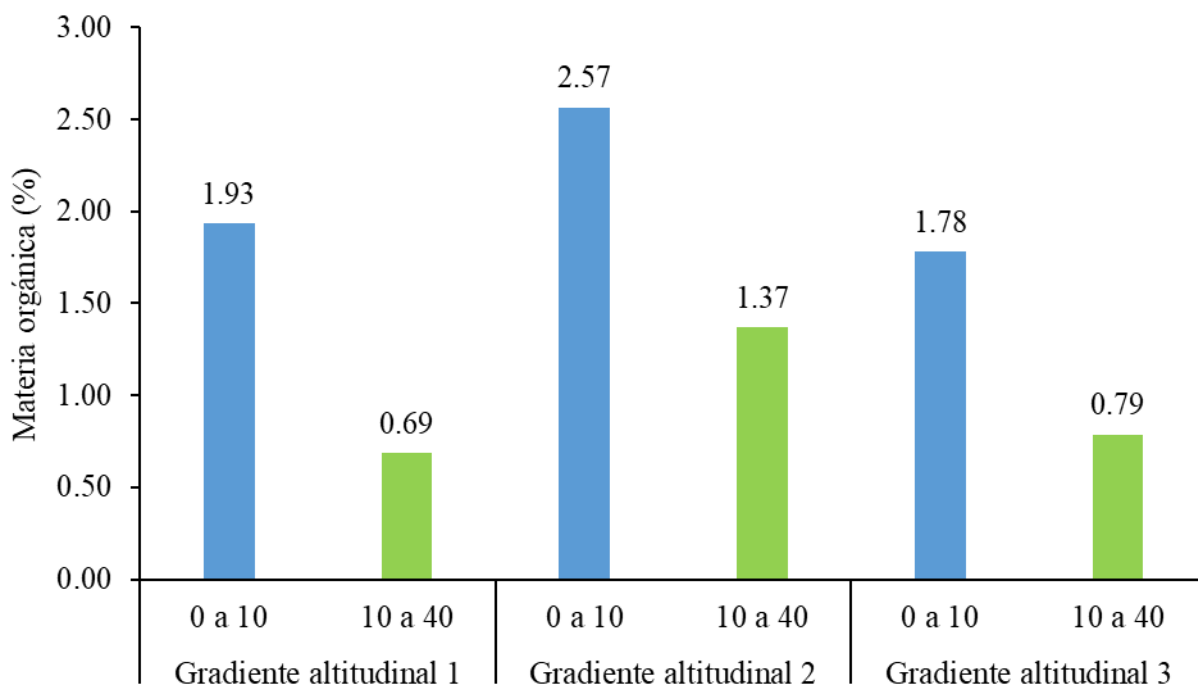
**Figura 3.** Nivel de pH de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

Tomando con referencia lo establecido por SAGARPA (2012), la CE del suelo se clasifica como efectos despreciables de la salinidad tanto para las tres gradientes altitudinales y las dos profundidades; se obtuvo, asimismo, una relación directamente proporcional hacia la gradiente altitudinal 2 e inversamente proporcional con la profundidad del suelo (**Figura 4**).



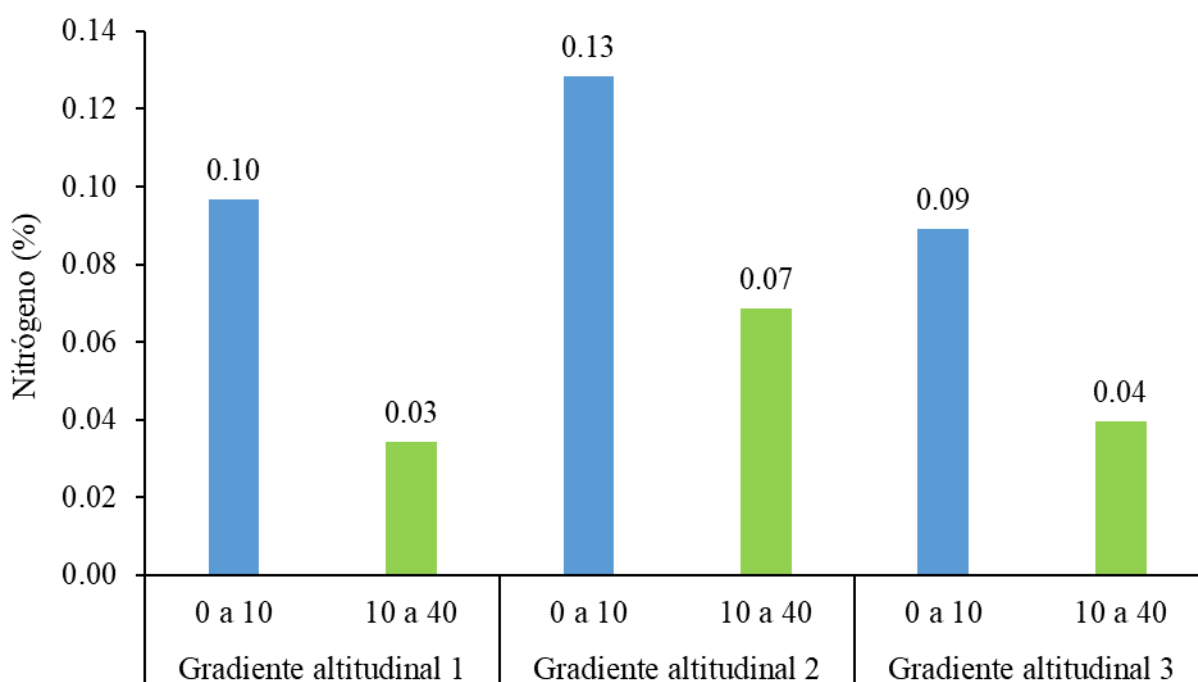
**Figura 4.** Conductividad eléctrica (CE) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

Según SAGARPA (2012), la MO del suelo se clasifica entre bajo a medio para las tres gradientes altitudinales y las dos profundidades; se observa, asimismo, una relación directamente proporcional hacia la gradiente altitudinal 2 e inversamente proporcional con la profundidad del suelo (**Figura 5**).



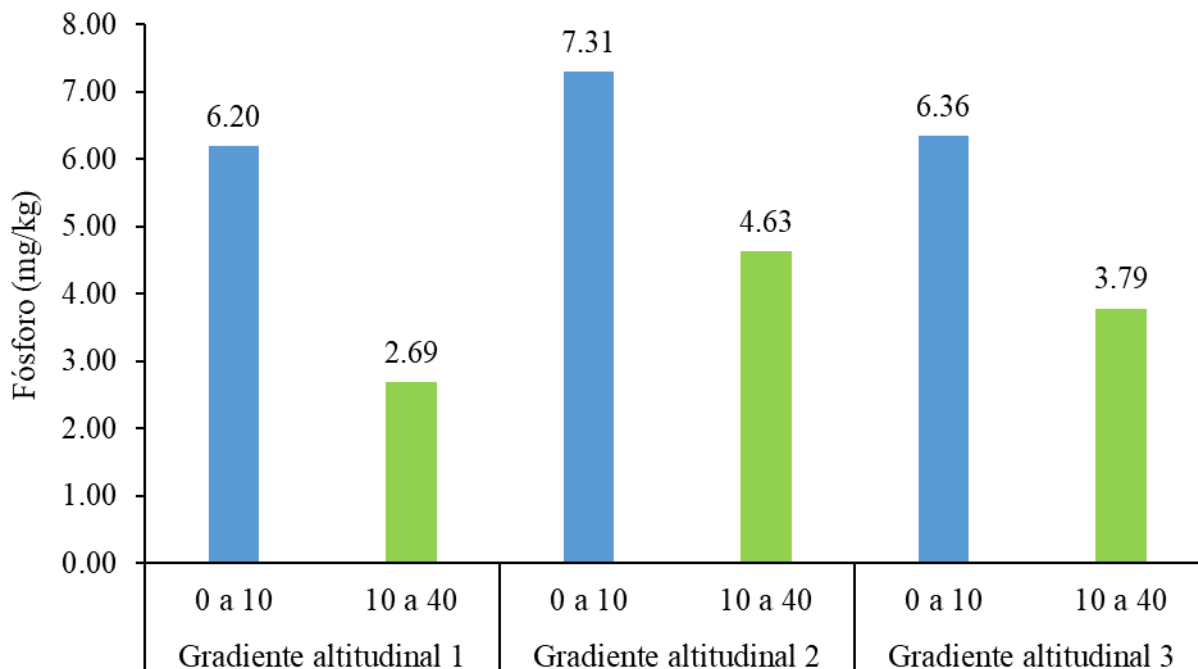
**Figura 5.** Materia orgánica (MO) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

De acuerdo con lo establecido por SAGARPA (2012), el N del suelo se clasifica como muy bajo, bajo y medio tanto en las tres gradientes altitudinales y las dos profundidades; se tiene, asimismo, una relación directamente proporcional con la altitud hasta la gradiente altitudinal 2 e inversamente proporcional con la profundidad del suelo (**Figura 6**).



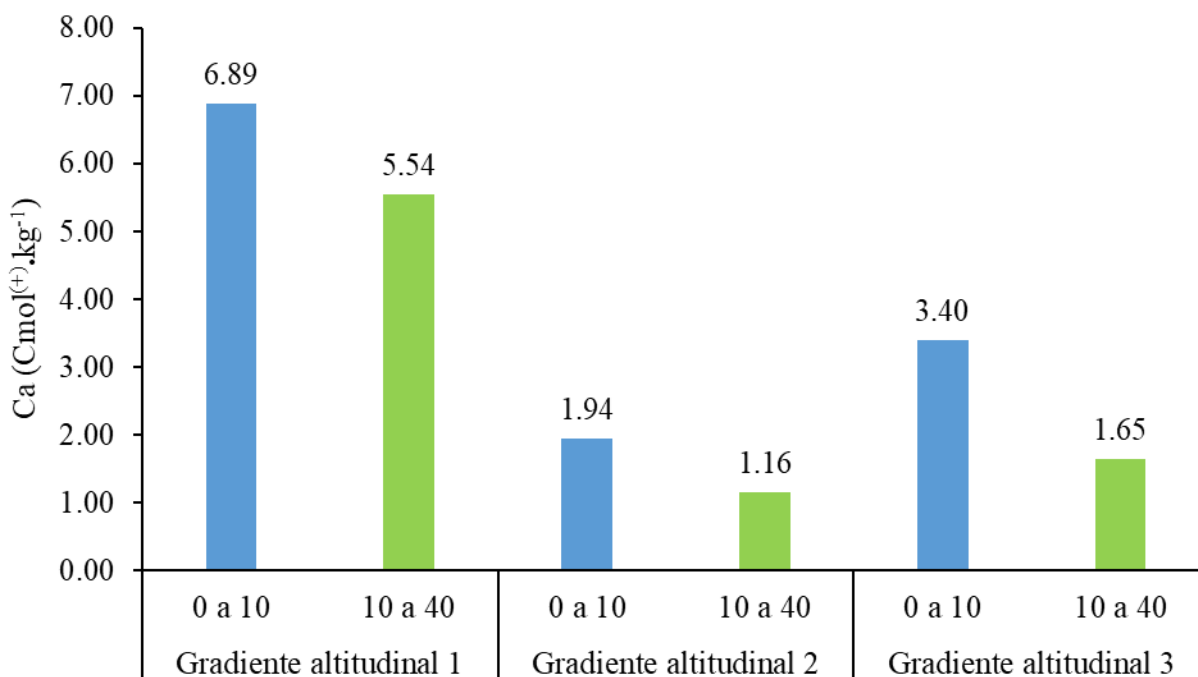
**Figura 6.** Nitrógeno (N) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

Tomando como referencia lo propuesto por SAGARPA (2012), el P del suelo se clasifica como muy bajo y bajo en las tres gradientes altitudinales y las dos profundidades. Se observa también, una relación directamente proporcional con la altitud e inversamente proporcional con la profundidad del suelo (**Figura 7**).



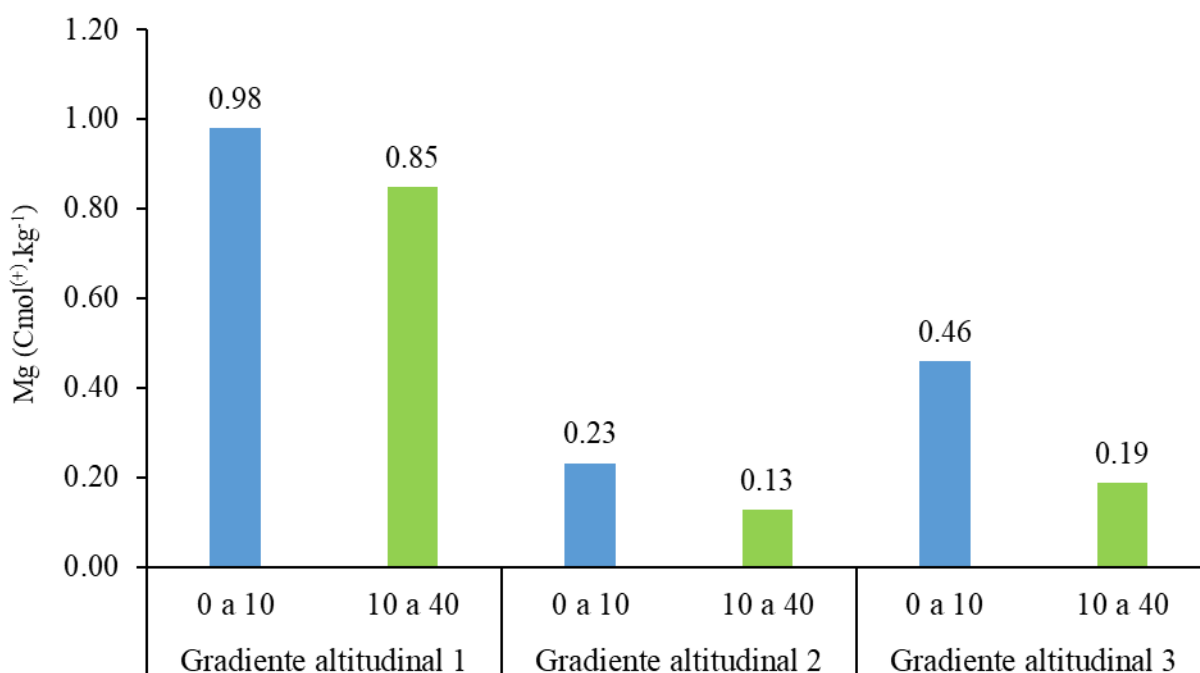
**Figura 7.** Fósforo (P) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

Según lo sugerido por SAGARPA (2012), el Ca del suelo se clasifica entre muy baja, baja y media en las tres gradientes altitudinales y las dos profundidades. Se obtuvo, asimismo, una relación inversamente proporcional con la altitud y la profundidad del suelo (**Figura 8**).



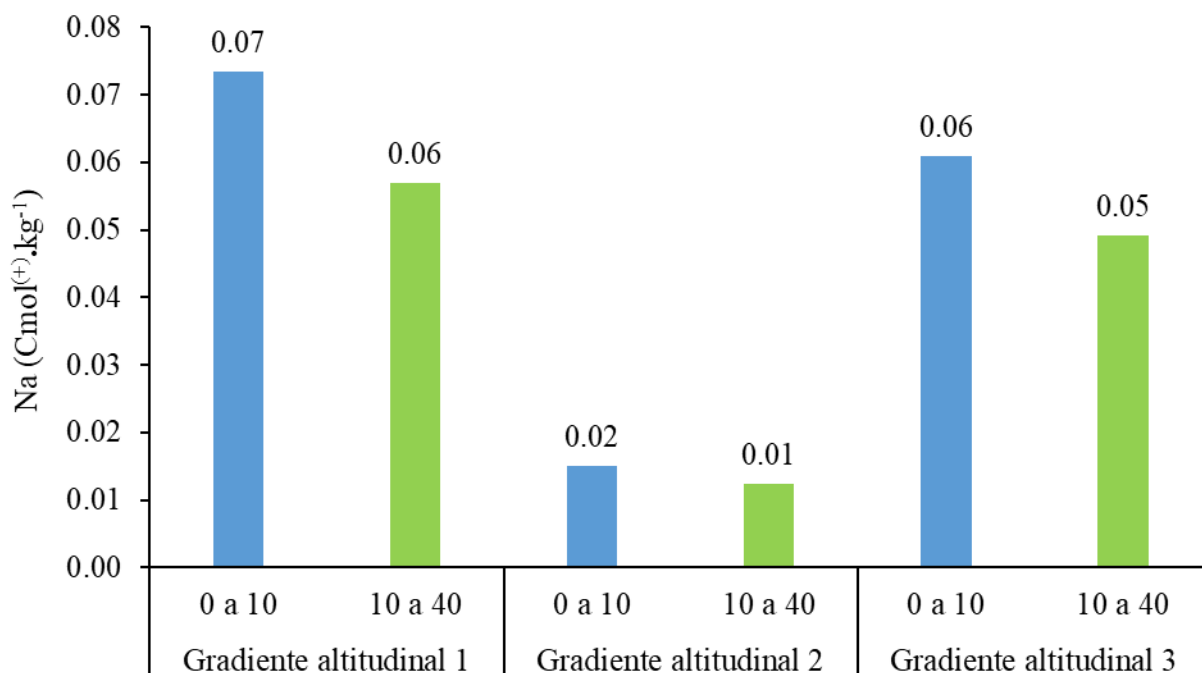
**Figura 8.** Calcio (Ca) intercambiable de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

De acuerdo a lo propuesto por SAGARPA (2012), el Mg del suelo se clasifica entre muy baja y baja en las tres gradientes altitudinales y las dos profundidades. Asimismo, se observa una disminución hasta la gradiente altitudinal 2, incrementándose ligeramente hacia la gradiente altitudinal 3; no obstante, existe una tendencia inversamente proporcional con la profundidad del suelo (**Figura 9**).



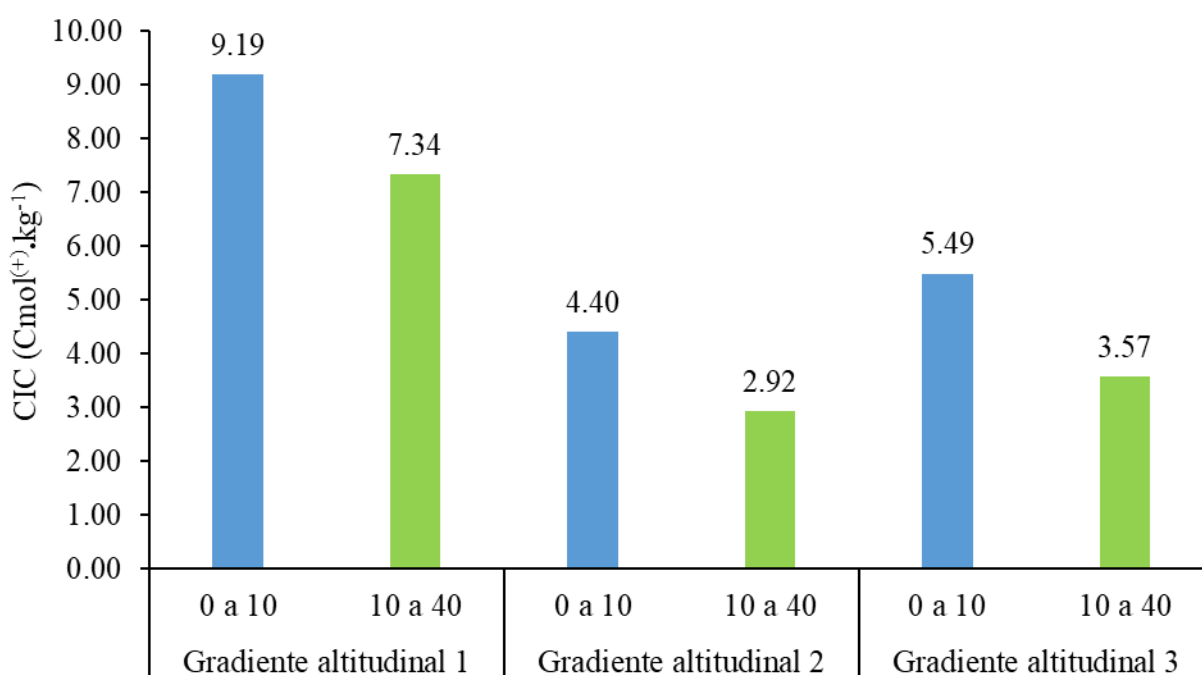
**Figura 9.** Magnesio (Mg) intercambiable de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

Tomando como referencia a SAGARPA (2012), el Na del suelo se clasifica como muy bajo tanto en las tres gradientes altitudinales y las dos profundidades. Se obtuvo, asimismo, una disminución hacia la gradiente altitudinal 2, ascendiendo luego hacia la gradiente altitudinal 3. Sin embargo, a mayor profundidad existe una relación inversamente proporcional (**Figura 10**).



**Figura 10.** Sodio (Na) intercambiable de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales.

Según lo indicado por SAGARPA (2012), la CIC del suelo se clasifica entre muy baja y baja en las tres gradientes altitudinales y las dos profundidades. Asimismo, se observa en general, una tendencia inversamente proporcional con la altitud y la profundidad del suelo (Figura 11).



**Figura 11.** Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos en tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

En tal sentido, Villarreal-Núñez *et al.* (2013) sostienen que, a pesar de que no se puede determinar directamente la calidad del suelo, se puede inferir a través de la medición de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Para ello, es necesario utilizar parámetros o indicadores que ayuden a identificar el inicio de los procesos degradativos. Tomando como base esta información, se pueden establecer estrategias de manejo tendientes a la mitigación o reversión de dichos procesos.

Bautista *et al.* (2004) por su parte, mencionan que las características físicas que pueden servir como indicadores de la calidad del suelo son aquellas que evidencian cómo este recurso se comporta en términos de absorción, retención y conducción de agua para las plantas. En consecuencia, se han propuesto ciertas características físicas del suelo como señales de su calidad. Estas incluyen su estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, capacidad de infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de retención del agua y la conductividad hidráulica cuando está saturado.

Para Wilson *et al.* (2008), la calidad del suelo se refiere a su capacidad para desempeñar diferentes funciones. Esto se puede medir a través de una serie de características físicas, químicas y biológicas que influyen en el crecimiento de las plantas y en la actividad biológica. Además, el suelo regula la circulación y almacenamiento del agua en el entorno ambiental, a la vez que actúa como un amortiguador en la formación y descomposición de compuestos perjudiciales para el medio ambiente.

Según Frazão *et al.* (2008), la calidad del suelo se ve afectada por la intervención de los seres humanos en la producción agrícola. Esto sucede porque se realizan cambios en las características físicas y químicas del suelo a través de fertilizantes, enmiendas y prácticas de labranza.

Lo antes descrito, corrobora la razón del por qué se realizó previamente la descripción de las propiedades fisicoquímicas de los suelos en las tres gradientes altitudinales del presente estudio. Es decir, a efectos de conocer la calidad de dichos suelos, fue necesario describirlos o caracterizarlos desde la óptica de sus propiedades fisicoquímicas, que a su vez sirvieron para la aplicación del SUSS.

Sobre el tema, cabe indicar que la materia orgánica es crucial en el suelo, dado que tiene un gran impacto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Estas propiedades a su vez afectan la capacidad de producción de los campos. Por lo tanto, es fundamental gestionar adecuadamente la materia orgánica dentro del agroecosistema para garantizar la sustentabilidad de los sistemas de producción (Labrador, 2001). En terrenos que cuentan con una considerable cantidad de materia orgánica, es posible obtener los rendimientos más altos que pueden alcanzarse para la variedad de cultivo, el clima y la forma en que se manejan los cultivos (Castellanos *et al.*, 2000).

De acuerdo con Rucks *et al.* (2004), las propiedades físicas de los suelos son en gran parte responsables de la capacidad de los humanos para utilizarlos de diversas maneras. La resistencia y la solidez de un suelo son determinadas por su condición física, así como la facilidad con la que las raíces pueden penetrarlo, la cantidad de aire presente en él, y su capacidad para drenar y retener agua y nutrientes.

Cabe indicar, además, que en un estudio llevado a cabo por Govaerts *et al.* (2006) se tuvo como objetivo identificar los datos esenciales para evaluar la calidad de los suelos en las tierras altas de México, específicamente en cultivos de trigo y maíz. Los resultados revelaron que practicar la cero labranza o no perturbar el suelo, junto con una correcta gestión de los residuos de la cosecha, beneficia las características físicas, químicas y biológicas del suelo.

Galantini *et al.* (2014) afirman también, que la importancia de la materia orgánica (MO) en el suelo radica en su estrecha asociación con la productividad, fertilidad y calidad en general del suelo. Se convierte en un elemento esencial del suelo, ya que influye en numerosos procesos, teniendo un impacto directo en las características físicas, químicas y biológicas. Un ejemplo es cuando la capacidad de cementación de la sustancia mantiene unido las partículas principales del suelo (como arena, limo y arcilla). Esto resulta en una estructura de poros interconectados que facilitan la circulación de agua, oxígeno, microorganismos, etc.

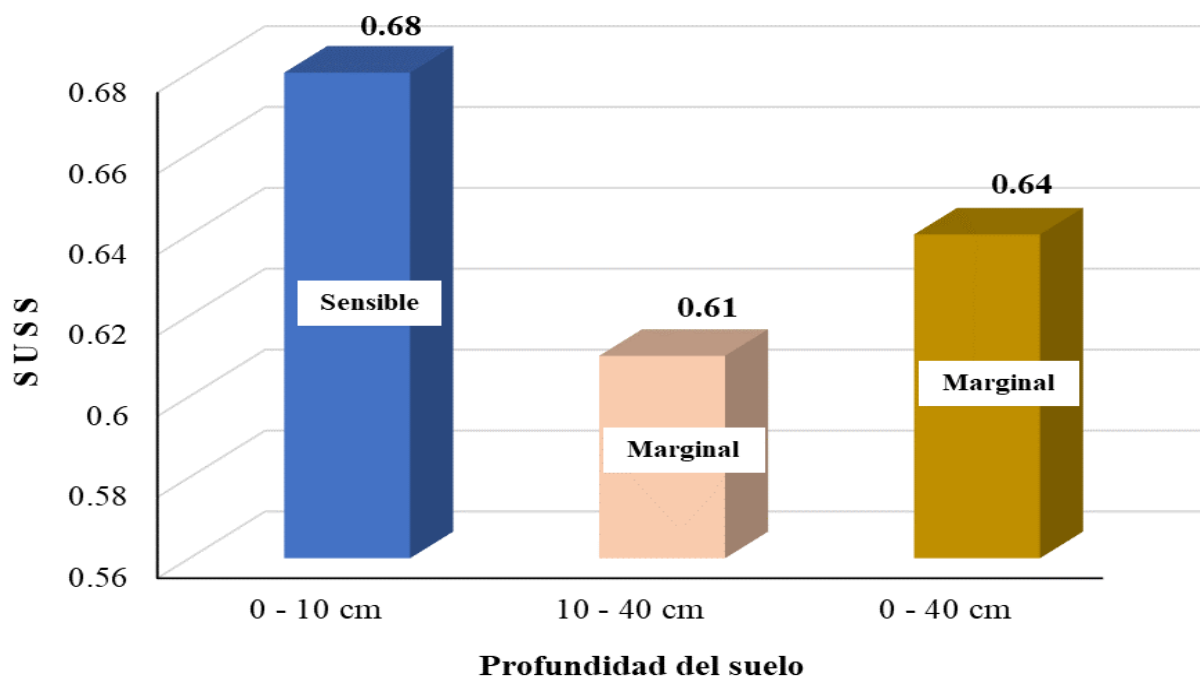
Debido a ello, García (2010) afirma que la pérdida de la materia orgánica es uno de los mayores peligros para el suelo, dado que no solo constituye amenaza para sus funciones y su fertilidad, sino que lo convierten en susceptible a los procesos erosivos.

En síntesis, según Bautista *et al.* (2004), las propiedades fisicoquímicas determinan la utilidad del suelo para un uso específico en un periodo de tiempo; es decir, la capacidad que tiene el suelo para cumplir sus funciones. Graetz (2002) concluye manifestando que es muy importante conocer de manera previa las condiciones del suelo, a fin de realizar las actividades adecuadas y no causar su empobrecimiento, con la consecuente disminución de la producción.

#### **4.2. Calidad del suelo de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, mediante la aplicación del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), como base para la gestión sostenible de los suelos**

##### **4.2.1. Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 1 (1 831 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm)**

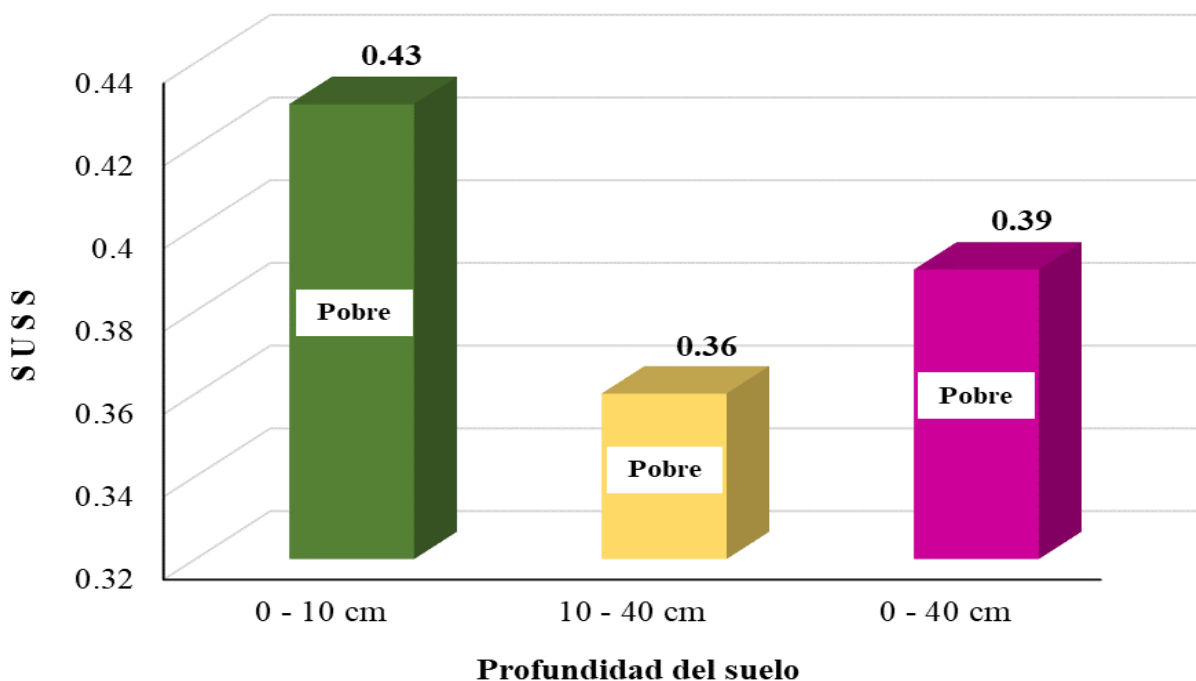
La calidad del suelo para la gradiente altitudinal 1 se clasifica según SAGARPA (2012), como sensible para los primeros 10 cm de profundidad del suelo, disminuyendo hasta los 40 cm de profundidad (marginal). Asimismo, para la profundidad total de 0 - 40 cm, la calidad del suelo clasifica como marginal (**Figura 12**).



**Figura 12.** Calidad del suelo de la gradiente altitudinal 1: 1 831 m s. n. m.

#### 4.2.2. Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 2 (1 920 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm)

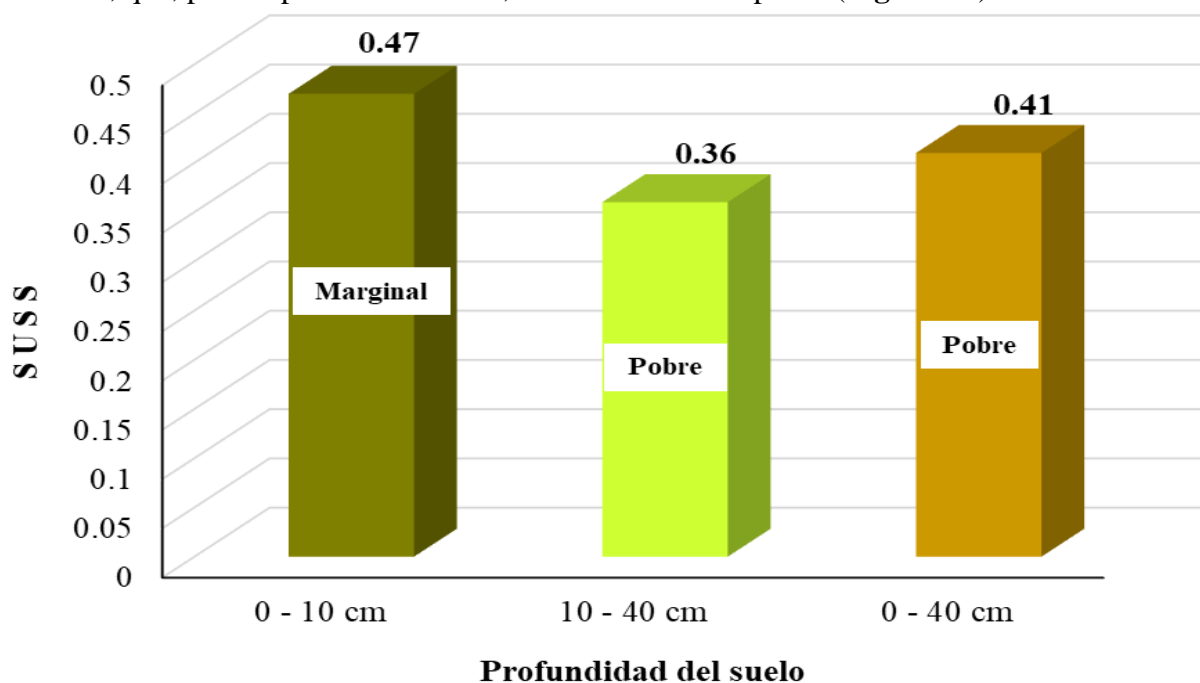
En la gradiente altitudinal 2, de acuerdo con SAGARPA (2012), la calidad del suelo para todas las profundidades incluyendo la profundidad total (0 - 40 cm), se clasifica como pobre. Muestra, asimismo, una tendencia decreciente del SUSS conforme se incrementa la profundidad (**Figura 13**).



**Figura 13.** Calidad del suelo de la gradiente altitudinal 2: 1 920 m s. n. m.

#### 4.2.3. Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 3 (2 046 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm)

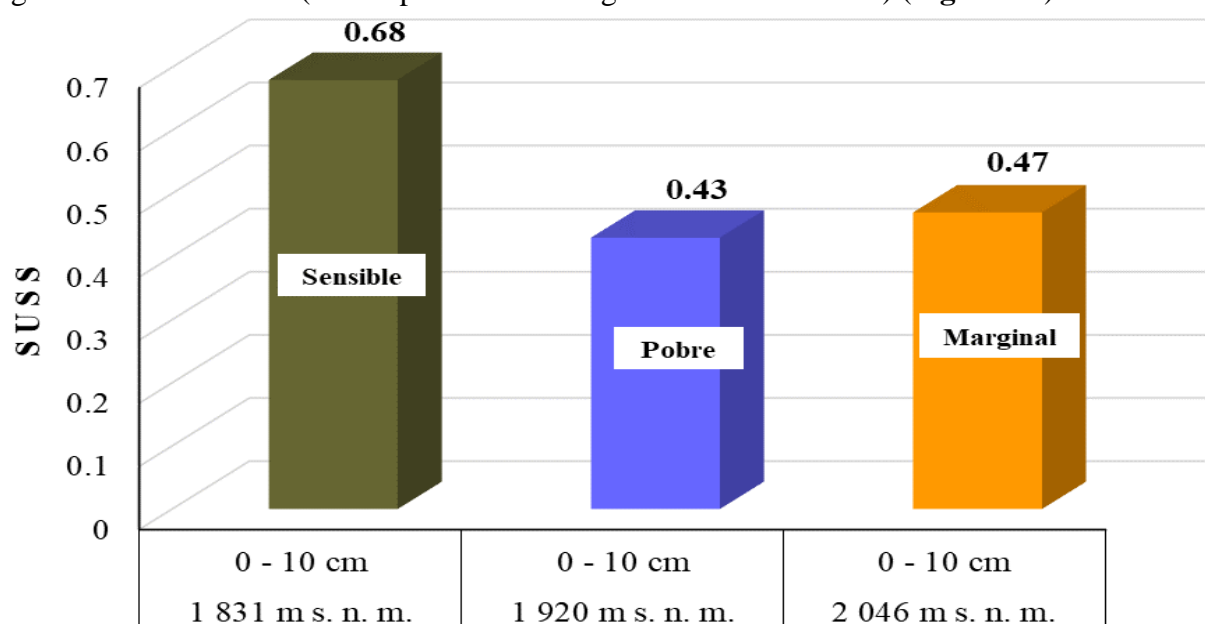
La gradiente altitudinal 3 presenta una calidad del suelo clasificada como marginal para los primeros 10 cm de profundidad, decreciendo a calidad pobre hasta los 40 cm; nótese también, que, para la profundidad total, la clasificación es pobre (**Figura 14**).



**Figura 14.** Calidad del suelo de la gradiente altitudinal 3: 2 046 m s. n. m.

#### 4.2.4. Calidad del suelo para la profundidad de 0 - 10 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente

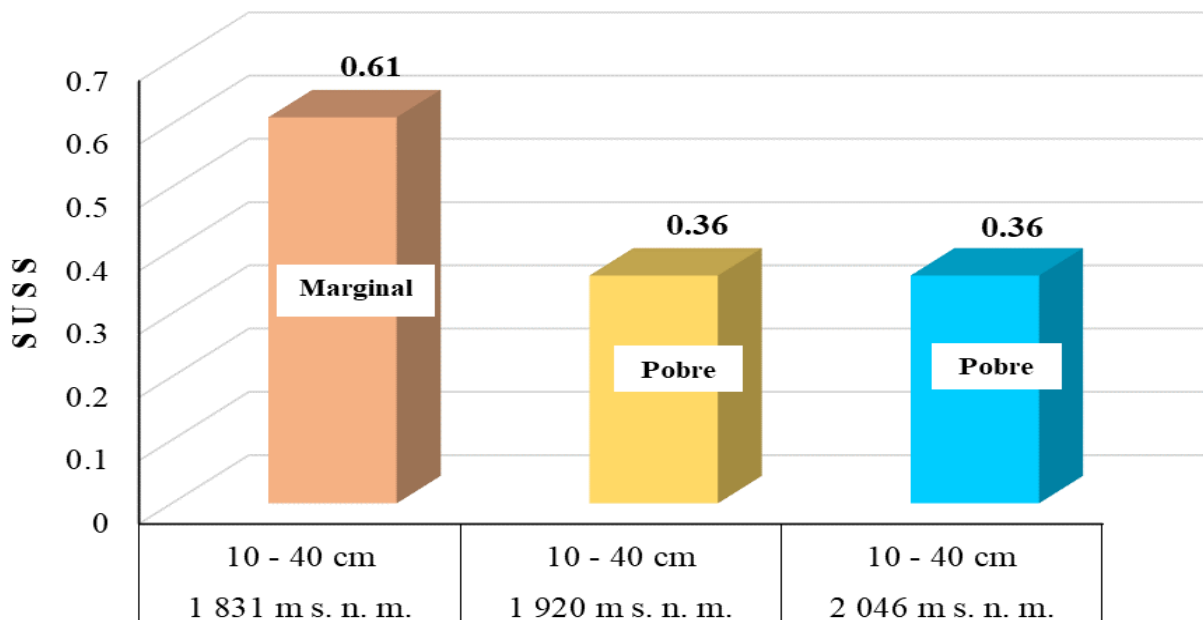
A profundidad de 0 - 10 cm, el suelo muestra una calidad decreciente desde la gradiente altitudinal 1 hasta 90 m superiores (gradiente 2); no obstante, la calidad mejora al ascender a la gradiente altitudinal 3 (126 m posteriores a la gradiente altitudinal 2) (**Figura 15**).



**Figura 15.** Calidad del suelo a profundidad 0 - 10 cm, en las tres gradientes altitudinales.

#### 4.2.5. Calidad del suelo para la profundidad de 10 - 40 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente

La calidad del suelo a profundidad de 10 - 40 cm, disminuye hasta la gradiente altitudinal 2, permaneciendo constante hasta la gradiente altitudinal 3 (Figura 16).

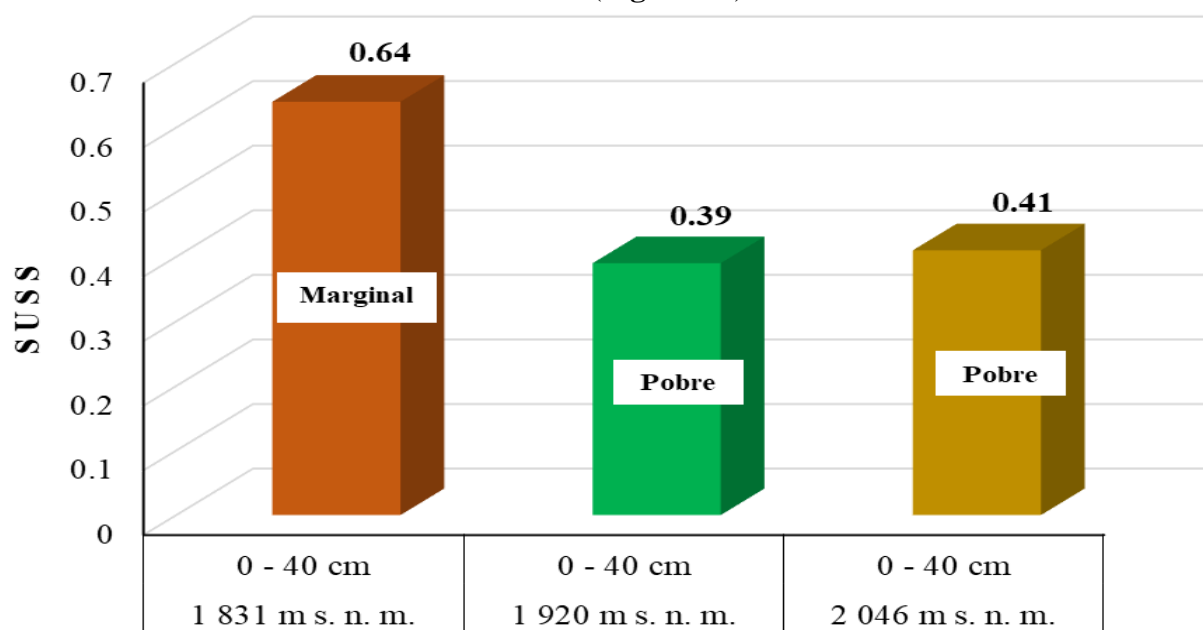


#### Profundidad del suelo y gradiente altitudinal

Figura 16. Calidad del suelo a profundidad 10 - 40 cm, en las tres gradientes altitudinales.

#### 4.2.6. Calidad del suelo para la profundidad total de 0 - 40 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente

Considerando las tres gradientes altitudinales y a la profundidad total de 0 - 40 cm, el suelo presenta comportamiento decreciente en su calidad, conforme se asciende de la gradiente altitudinal 1 hacia la gradiente altitudinal 2; sin embargo, al ascender hacia la gradiente altitudinal 3 la calidad se mantiene constante (Figura 17).



#### Profundidad del suelo y gradiente altitudinal

Figura 17. Calidad del suelo a profundidad 0 - 40 cm, en las tres gradientes altitudinales.

En general, al analizar la calidad del suelo (basado en el SUSS) para cada una de las tres gradientes altitudinales, se observa que presentan un comportamiento decreciente conforme se incrementa la profundidad desde 0 - 10 cm hasta 10 - 40 cm (**Figura 12, 13 y 14**), lo cual podría deberse según la **Tabla 1**, a la variación significativa de la mayoría de los indicadores fisicoquímicos empleados para el cálculo del SUSS, a excepción del pH, quien no mostró significancia estadística en ambas profundidades del suelo.

Al respecto, en investigaciones desarrolladas por Manson (2008) se encontró que la calidad del suelo fue alta debido a las importantes concentraciones de materia orgánica de las fincas; es decir, el humus resultante de su descomposición contribuye a mejorar la estabilidad de los agregados, incrementar la porosidad, facilitar el intercambio gaseoso e hídrico, y prevenir probables procesos de degradación de los suelos, particularmente en las fincas establecidas sobre terrenos con elevada pendiente y con mayor intensidad de manejo, donde el riesgo es mayor. Lo antes descrito corrobora los resultados obtenidos, toda vez que se observa mayor contenido de materia orgánica en los primeros 10 cm de profundidad del suelo, proporción que disminuye conforme se incrementa la profundidad.

Asimismo, Manson (2008) refiere luego de estudios realizados, que la calidad del suelo en cuanto a disponibilidad de macronutrientes (N, P, K) varía de baja a media en bosques y de media a alta en cafetales; estos resultados indican una calidad superior del suelo respecto a los obtenidos en la presente investigación, donde a una profundidad total de 0 - 40 cm, se observa que el suelo presenta calidad pobre a marginal.

Los resultados del presente estudio tampoco concuerdan con los obtenidos por Cruz (2019), quien al investigar acerca del mapeo y análisis de la calidad fisicoquímica de los suelos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria La Molina aplicando herramientas SIG, encontró que el 94,31% de suelos tuvo Moderada Calidad y un 5,69% tuvo Alta Calidad. Esta diferencia podría deberse a factores como la altitud, relieve, factores edáficos y factores climáticos, dado que corresponden a dos zonas de vida distintas.

De acuerdo con Astier-Calderón *et al.* (2002), los indicadores de la calidad del suelo deben identificar un grupo de características del mismo, según los siguientes criterios: Aclarar los procesos ecosistémicos, integrar parámetros biológicos y fisicoquímicos de los suelos y sus procesos; ser sensible a las variaciones del manejo en un horizonte temporal relativamente corto y a los cambios climáticos; y en lo posible, formar parte de una base de datos existente. Así también, debe ser relativamente económico, preciso, fácil de medir e interpretar; práctico y útil para ser aplicado en diferentes condiciones de campo y diversas situaciones ambientales

y socioeconómicas tanto por la comunidad científica como por agricultores, extensionistas, ambientalistas, instituciones del gobierno y responsables de delinear políticas de manejo.

Según Etchevers *et al.* (2009), los indicadores físicos empleados en la evaluación de la calidad del suelo están relacionados tanto con propiedades que reflejen la forma en que el suelo capta, retiene y proporciona agua a las plantas, así como con las condiciones que restringen el crecimiento de raíces, el surgimiento de plántulas, la infiltración y la circulación del agua al interior del perfil, promoviendo el intercambio óptimo de gases.

Doran y Zeiss (2000) afirman, asimismo, que la calidad y salud del suelo son esenciales en la biodiversidad para producir productos alimenticios y energía, manteniendo de esta manera, en buenas condiciones el medio ambiente y su calidad.

Quiroga y Funaro (2004) manifiestan así también, que es importante tener en cuenta que la materia orgánica tiene un impacto directo en las características del suelo, como su estructura y la cantidad de carbono y nitrógeno disponibles. Esto la convierte en el indicador principal y con una influencia significativa en la calidad y productividad del suelo.

Finalmente, FAO (2002) corrobora el hecho de que la presencia de materia orgánica en el suelo es un factor crucial que determina la calidad del suelo, tanto en términos de su utilidad para la agricultura como en su impacto ambiental. La actividad biológica del suelo se ve principalmente influenciada por la sustancia orgánica presente en el mismo. La cantidad de vida, la variedad y la actividad de los organismos presentes en el suelo se vinculan directamente con la presencia de materia orgánica. El mismo autor indica, además, que los suelos son afectados en sus propiedades químicas y físicas por la presencia de materia orgánica y la actividad biológica que esta provoca. El contenido de materia orgánica influye positivamente en la agregación y estabilidad estructural del suelo, incrementándolas. Además, estas acciones también aumentan la tasa de penetración de agua en el suelo y la cantidad de agua que se puede utilizar, al igual que la capacidad para resistir la erosión causada por el agua y el viento. La presencia de material orgánico en el suelo también ayuda a mejorar la forma en que los nutrientes esenciales para las plantas se mueven y están disponibles.

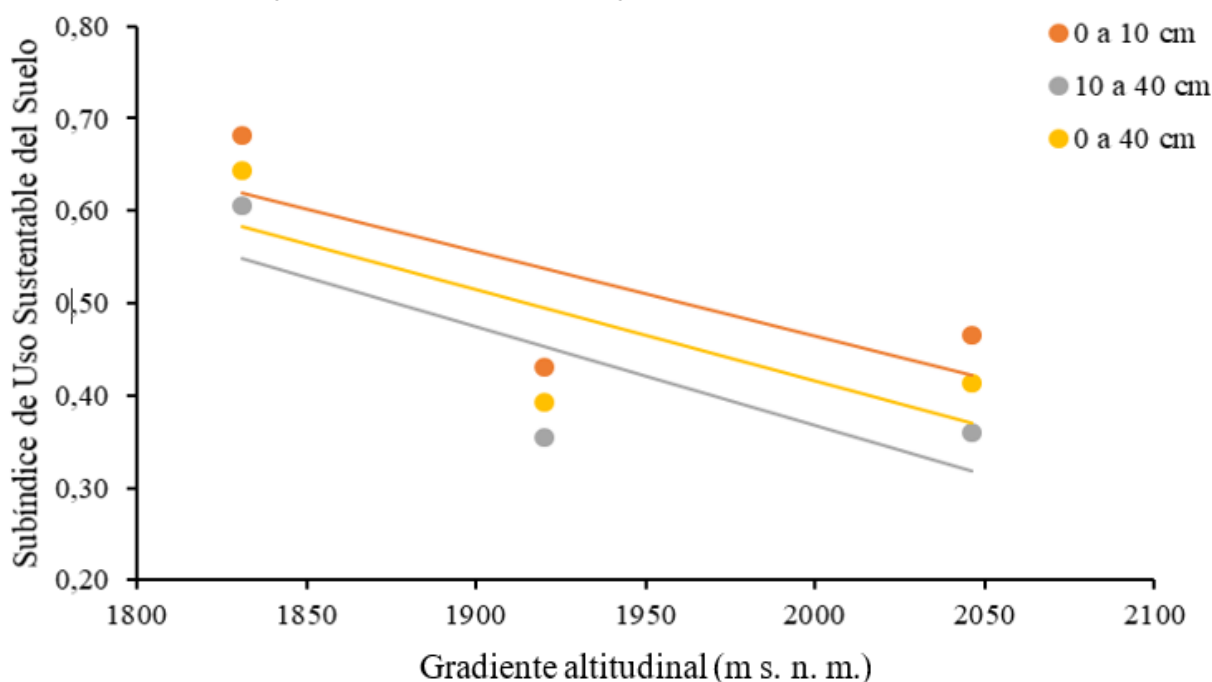
#### **4.3. Relación entre el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) y la gradiente altitudinal con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla***

No se logró demostrar la presencia de correlación estadística entre las dos variables estudiadas; pese a la presencia de coeficientes negativos que indicarían la existencia de una relación inversa (**Tabla 20** y **Figura 18**), la ausencia de correlación podría deberse a la escasa cantidad de casos encontrados.

**Tabla 20.** Correlación del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo con la gradiente altitudinal en diferentes profundidades del suelo.

Profundidad de muestreo	N	Correlación de Pearson	Sig. (bilateral)
0 - 10 cm	3	-0,729	0,480 <sup>ns</sup>
10 - 40 cm	3	-0,805	0,405 <sup>ns</sup>
0 - 40 cm	3	-0,769	0,441 <sup>ns</sup>
<b>Global</b>	<b>9</b>	<b>-0,734*</b>	<b>0,024*</b>

ns: no existen correlación significativa; \*: existen correlación significativa.



**Figura 18.** Distribución del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo en cada gradiente altitudinal para cada una de las tres profundidades del suelo.

Al respecto, Herrick (2000) sostiene que la calidad del suelo se define por su capacidad para mantener la productividad de los cultivos, preservar la calidad del agua y del aire, y ofrecer un entorno saludable para las plantas, animales y seres humanos en un ecosistema determinado. En consecuencia, con la conexión entre la calidad de los suelos y la sustentabilidad en la agricultura se trata de producir alimentos en un suelo que tenga la capacidad de funcionar, en un proceso de producción que sea viable desde el punto de vista económico, seguro desde el contexto ambiental y aceptable en la dimensión social. En este escenario, la calidad del suelo se constituye en un factor determinante para el manejo adecuado del mismo.

Wilson *et al.* (2008) manifiestan, asimismo, que, en lo que respecta a la producción de cultivos, el suelo desempeña un papel fundamental al proporcionar los nutrientes necesarios y promover el desarrollo de las plantas. Estas funciones están relacionadas con la capacidad del suelo para proporcionar los nutrientes esenciales de manera eficiente y crear un entorno propicio para la conversión del dióxido de carbono utilizando la energía de la luz solar a través de la fotosíntesis.

Doran (2002) encontró por otra parte, que las características edáficas no se mantienen constantes, sino que están en constante variación a través del tiempo debido a los factores de su formación, tales como el clima, el material madre, los organismos que allí viven, las actividades antrópicas, etc. De acuerdo con García (2008), dichos cambios en los suelos se producen de manera gradual a través del tiempo, lo cual permite inferir que no existe una sola medida física, biológica o química que permita dar un valor el estado de salud y calidad de los suelos.

Según Shukla *et al.* (2006), evaluar las variaciones en los indicadores de calidad de los suelos es vital para poder identificar a través del tiempo si la calidad de los suelos sometidos a un determinado uso y sistema de manejo está en mejoría, permanece constante o se encuentra en declive.

Para Velásquez (2004), en sistemas tanto naturales como intervenidos, las funciones y las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos están regidas por un conjunto de factores jerárquicamente establecidos que funcionan a diferentes niveles: el clima a mayor nivel; la naturaleza de los sustratos que determina las reservas de nutrientes; y la cantidad y calidad de las arcillas, las comunidades vegetales que determinan la cantidad y calidad de la materia orgánica generada, los organismos denominados ingenieros del ecosistema. Refiere, asimismo, que en los sistemas agrícolas la calidad de los suelos está influenciada por diversos factores externos como el uso y manejo de los suelos, interrelación entre ecosistema y medio ambiente, prioridades socioeconómicas, etc.

Gil-Sotres *et al.* (2005) afirman en este contexto, que mantener la calidad de los suelos resulta crítico para un ecosistema sustentable, por lo que es necesario seleccionar apropiadamente los indicadores de calidad que otorguen respuesta inmediata a los cambios, diferenciación efectiva entre los sistemas de manejo, alta sensibilidad al estrés y a la regeneración ambiental, y reflejo de la variabilidad espacial y temporal.

La sustentabilidad de los sistemas y de las prácticas de manejo, se pueden evaluar mediante estudios de calidad del suelo (Shukla *et al.*, 2006), la misma que no puede medirse directamente; sin embargo, es posible inferir a través de la determinación de atributos o indicadores (Brejda *et al.*, 2000) y la comparación de los resultados obtenidos para evaluar los efectos de los diferentes sistemas y/o prácticas (Giuffré *et al.*, 2006).

Finalmente, Baveye *et al.* (2016) manifiestan que en la actualidad se viene insertando la frase multifuncionalidad de los suelos, la misma que no solamente considera las interrelaciones productivas, sino diversas funciones que llevan a cabo los suelos, las mismas que están constituidas por la regulación del ciclo del agua, contribución al almacenamiento de carbono,

preservación de la diversidad biológica, etc. No obstante, como producto de la multifuncionalidad, las características deben interrelacionarse con la función esencial que lleva a cabo; es decir, con los sistemas que involucren producir los diversos cultivos.

La posibilidad de evaluar las mejoras y disminuciones de calidad se logra a través de la obtención de indicadores, lo cual implica la evaluación y seguimiento de los cambios (Mariscal, 2008).

## V. CONCLUSIONES

- La mayoría de los indicadores fisicoquímicos del suelo evaluados en las tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, muestran valores adecuados prioritariamente para altitudes y profundidades menores, a excepción del pH, P, Mg y CIC.
- La calidad del suelo determinada mediante el SUSS en las tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, presenta un comportamiento inversamente proporcional a la profundidad.
- La calidad del suelo definida mediante el SUSS muestra una relación inversamente proporcional a las tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, principalmente al ascender de la gradiente altitudinal 1 hacia la gradiente altitudinal 2, manteniendo un valor constante al ascender de esta última hacia la gradiente altitudinal 3.
- El suelo de la gradiente altitudinal 1 con sistema agroforestal de *C. arabica* - *I. macrophylla* presenta calidad marginal y de las gradientes altitudinales 2 y 3 posee calidad pobre, por lo que en general, la calidad del suelo para fines agrícolas se encuentra amenazada o afectada, donde los indicadores de calidad son distantes de los valores deseables.
- No existe relación entre el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) y las gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

## VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Continuar evaluando en próximas tesis, los indicadores fisicoquímicos y la calidad del suelo de las tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, a fin de obtener datos que podrían indicar una tendencia en un horizonte temporal.
- En lo posible, en la zona en estudio, instalar sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, hasta una gradiente altitudinal de 1 831 m s. n. m., altitud donde tanto indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo tuvieron mejor comportamiento.
- A mayores altitudes (superiores a 1 831 m s. n. m.) donde la calidad del suelo decrece, debe aplicarse abonos y/o enmiendas orgánicas a los suelos con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, a fin de garantizar una adecuada calidad.
- En futuros estudios, incluir además de gradientes altitudinales, sistemas agroforestales con diferentes componentes.

## VII. REFERENCIAS

- Allaire, S. E., Lange, S. F., Lafond, J. A., Pelletier, B., Cambouris, A. N., & Dutilleul, P. (2012). Multiscale spatial variability of CO<sub>2</sub> emissions and correlations with physico-chemical soil properties. *Geoderma*, 170, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.019>
- Andrianarisoa, K. S., Zeller, B., Dupouey, J. L., & Dambrine, E. (2009). Comparing indicators of N status of 50 beech stands (*Fagus sylvatica* L.) in northeastern France. *Forest Ecology and Management*, 257(11), 2241-2253. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.037>
- Arana, V. H. (2003). *Dinámica del nitrógeno en un sistema de manejo orgánico de café (Coffea arabica L.) asociado con poró [Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook]* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3214>
- Arcila, J. (2004). *Anormalidades en la floración del cafeto* (Avances Técnicos 320). Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ).
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A. M., Salazar, L. F., y Hincapié, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ).
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M., y Etchevers-Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605-620.
- Atlas, R. M., y Bartha, R. (2002). *Ecología microbiana y microbiología ambiental* (4.<sup>a</sup> ed.). Addison Wesley.
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A. J., & Morales, C. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7(2), 303-321. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>
- Bai, Y., Chen, S., Shi, S., Qi, M., Liu, X., Wang, H., Wang, Y., & Jiang, C. (2020). Effects of different management approaches on the stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in a mature Chinese fir plantation. *Science of The Total Environment*, 723, 137868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137868>
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A., y Mata, D. A. (2018). *Importancia del pH y la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*. INTA.

- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*, 147(3-4), 159-171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Bautista, A., Etchevers, J., del Castillo, R. F., y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90-97.
- Baveye, P. C., Baveye, J., & Gowdy, J. (2016). Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. *Frontiers in Environmental Science*, 4(41), 1-49. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>
- Bazán, R. (1996). *Manual para el análisis químico de suelos, plantas y aguas*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Bornemisza, E. (1982). *Introducción a la Química de Suelos*. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico.
- Brejda, J. J., Moorman, T. B., Karlen, D. L., & Dao, T. H. (2000). Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators I. Central and Southern High Plains. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2115-2124. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6462115x>
- Bremer, E., & Ellert, K. (2004). *Soil quality indicators: A review with implications for agricultural ecosystems in Alberta*. Alberta Environmentally Sustainable Agriculture Soil Quality Program, Alberta Agriculture, Food and Rural Development.
- Budhu, M. (2007). *Soil mechanics and foundations* (2.<sup>a</sup> ed.). John Wiley & Sons Inc.
- Cabon, M. (2015). *Effect of shade on microclimate, soil fertility and productivity of coffee trees in Costa Rica*. CIRAD-CATIE.
- Camayo-Vélez, G. C., Arcila-Pulgarín, J. (1996). Estudio anatómico y morfológico de la diferenciación y desarrollo de las flores del cafeto *Coffea arabica* L. variedad Colombia. *Cenicafé*, 47(3), 121-139.
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., y Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo*, 25(2), 173-178.
- Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., y Aguilar-Santelises, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas agrícolas, plantas y ECP*. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2013). *Manual del cafetero colombiano*, Tomo I. (CENICAFÉ).

- Cruz, K. F. (2019). *Mapeo y análisis de calidad física y química de los suelos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria La Molina aplicando herramientas SIG* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3939>
- DaMatta, F. M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research*, 86(2), 99-114. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.001>
- De la Rosa, D. (2008). *Evaluación agro-ecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible*. Mundi-Prensa.
- De Los Ángeles, P. J. (2007). *Diseño de parque municipal en Santa Cruz de los Cárhamos*. Universidad de Castilla-La Mancha.
- Doran, J. W. (2002). Soil health and global sustainability: Translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 119-127. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00246-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00246-8)
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1), 3-11. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)
- Drury, C. F., Tan, C. S., Reynolds, W. D., Welacky, T. W., Weaver, S. E., Hamill, A. S., & Vyn, T. J. (2003). Impacts of Zone Tillage and Red Clover on Corn Performance and Soil Physical Quality. *Soil Science Society of America Journal*, 67(3), 867-877. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.8670>
- Duval, M. E., Galantini, J. A., Martínez, J. M., & Iglesias, J. O. (2016). Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. *Ciencia del suelo*, 34(2), 197-209.
- Etchevers, J. D., Hidalgo, C., Pajares, S., Gallardo, J. F., Vergara, M. Á., Bautista, M. A., y Padilla, J. (2009). Calidad o salud del suelo: conceptos, indicadores y aplicación en agricultura. En J. López y M. de L. Rodríguez (Coords.), *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México* (pp. 107-121). Universidad Nacional Autónoma de México UNAM.
- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V., y Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del Suelo*, 27(1), 103-114.

- Frazão, L. A., Píccolo, M. de C., Feigl, B. J., Cerri, C. C., & Cerri, C. E. P. (2008). Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(5), 641-648. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000500012>
- Gaia, J. H., Pereira, M. G., Francelino, M. R., y Bessa, J. P. (2020). Physical and chemical attributes of soil on gully erosion in the Atlantic forest biome. *Revista Ambiente & Água*, 15(2), 1-15, e2459. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2459>
- Galantini, J., Céspedes, C., y Millas, P. (2014). *Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo*. Disponible en: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40198.pdf>
- García I., C. (2008). *Enmiendas orgánicas para suelos basadas en residuos orgánicos*. Discurso de ingreso leído por el Académico electo en el acto de la Sesión Solemne de su Toma de Posesión como Académico de Número. Academia de Ciencias de la Región de Murcia.
- García, Á. (2010). Manejo de la degradación del suelo. En H. Burbano y F. Silva (Eds.), *Ciencia del suelo. Principios básicos* (pp. 309-356). Sociedad Colombina de la Ciencia del Suelo.
- García, Y., Ramírez, W., y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- Ghaemi, M., Astaraei, A. R., Emami, H., Nassiri, M., & Sanaeinejad, S. H. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds- east of Mashhad- Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14(4), 987-1004.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., & Seoane, S. (2005). Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(5), 877-887. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.10.003>
- Giuffré, L., Romaniuk, R., Conti, M. E., & Bartoloni, N. (2006). Multivariate evaluation by quality indicators of no-tillage system in Argiudolls of rolling pampa (Argentina). *Biology and Fertility of Soils*, 42(6), 556-560. <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0051-8>
- Govaerts, B., Sayre, K. D., & Deckers, J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.005>
- Graetz, H. (2002). *Suelos y fertilización*. Trillas.

- Hameed, A., Hussain S. A., & Rasul H. A. (2020). "Coffee Bean-Related" agroecological factors affecting the coffee. En J.-M. Mérillon y K. G. Ramawat (Eds.), *Co-evolution of secondary metabolites* (pp. 641-705). Springer.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Herrick, J. E. (2000). Soil quality: An indicator of sustainable land management? *Applied Soil Ecology*, 15(1), 75-83. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00073-1](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00073-1)
- Herzog, F. (1994). Multipurpose shade trees in coffee and cocoa plantations in Côte d'Ivoire. *Agroforestry Systems*, 27(3), 259-267. <https://doi.org/10.1007/BF00705060>
- Huamani, H., y Mansilla, L. (1995). Caracterización del estado nutricional de los suelos degradados del Alto Huallaga. *Tropicultura*, 1(2), 7-17.
- Instituto Hondureño del café. (2001). *Manual de caficultura* (3.ª ed.). IHCAFE.
- Jiménez, R., y González-Quñones, V. (2006). La calidad de suelos como medida para su conservación. *Edafología*, 13(3), 125-138.
- Labrador, J. (2001). *La materia orgánica en los agroecosistemas* (2.ª ed.). Mundi-Prensa.
- Labrador, J. (2008). *Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica*. Sociedad Española de Agricultura Ecológica.
- Leblanc, H. A., McGraw, R. L., & Nygren, P. (2007). Dinitrogen-fixation by three neotropical agroforestry tree species under semi-controlled field conditions. *Plant and Soil*, 291(1-2), 199-209. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9186-0>
- Lin, B. B. (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.010>
- Marcela, T., Dalurzo, H., y Vázquez, S. (2010). Fosfatasa ácida en Oxisoles bajo cultivo de tabaco. *Ciencia del Suelo*, 28(1), 33-38.
- Mariscal, I. (2008). *Recuperación de la calidad de Ultisoles mediterráneos degradados, mediante la aplicación de enmiendas y formas alternativas de uso* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo digital UPM. <https://oa.upm.es/1597/>
- Márquez, F. R., Quispe, P., Molleapaza, N., Cabrera, S., & Peña, J. (2020). Relación entre las características del suelo y altitud con la calidad sensorial de café cultivado bajo sistemas agroforestales en Cusco, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 11(4), 529-536. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.04.08>

- Martin, N., y Adad, I. (2006). Generalidades más importantes de las ciencias del suelo. En *Disciplina Ciencias del Suelo* (504 p.). Tomo I. Pedología. Universidad Agraria de La Habana.
- Mendoza, R. (2011). *Manejo de suelos utilizando indicadores de calidad del suelo*. Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad Nacional Agraria.
- Meylan, L. (2012). *Design of cropping systems combining production and ecosystem services: developing a methodology combining numerical modeling and participation of farmers. Application to coffee-based agroforestry in Costa Rica* [Tesis de doctorado, Montpellier, SupAgro].
- Meza, A. Sabogal, C., y de Jong, W. (2006). *Rehabilitación de áreas degradadas en la Amazonia peruana. Revisión de experiencias y lecciones aprendidas*. CIFOR.
- Ministerio de Agricultura. (2011). *Cadena agroproductiva de papa. Manejo y fertilidad de suelos*. MINAG.
- Mogollón, M. R. (2012). *Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia] Repositorio Institucional.  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9950/822104.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moscattelli, G., Sobral, R., y Nakawa, V. (2005). *Nueva tendencia para conocer el estado de los suelos*. INTA.
- Municipalidad Distrital de Chontabamba. (2019). *Proyecto: "Promoción y mejoramiento de los atractivos turísticos en el distrito de Chontabamba"*. Gerencia de Desarrollo Económico y Turismo.
- Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M. T., Landi, L., Pietramellara, G., & Renella, G. (2003). Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 54(4), 655-670. <https://doi.org/10.1046/j.1351-0754.2003.0556.x>
- Navarrete, A., Vela, G., López, J., y Rodríguez, Ma. De L. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29-37.
- Navarro, G., y Navarro, S. (2013). *Química agrícola. Química del suelo y los nutrientes esenciales para las plantas* (3.ª ed.). Mundi-Prensa.
- Nortcliff, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 161-168. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00253-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00253-5)

- Nygren, P., & Ramírez, C. (1995). Production and turnover of N<sub>2</sub> fixing nodules in relation to foliage development in periodically pruned *Erythrina poeppigiana* (Leguminosae) trees. *Forest Ecology and Management*, 73(1-3), 59-73. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03505-Q](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03505-Q)
- Nygren, P., Fernández, M. P., Harmand, J.-M., & Leblanc, H. A. (2012). Symbiotic dinitrogen fixation by trees: An underestimated resource in agroforestry systems? *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94(2-3), 123-160. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9542-9>
- Ochoa, V., Hinojosa, B., Gómez-Muñoz, B., y García-Ruiz, R. (2007). Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Iniciación a la Investigación*, 2(r1), i-x.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse*. FAO. <https://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/#:~:text=4%20de%20diciembre%20de%202015,en%20la%20promoci%C3%B3n%20de%20pr%C3%A1cticas>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. FAO.
- Padilla, W. (2002). *Fertilización de suelos y nutrición vegetal*. Clínica Agrícola-Agrobiolab.
- Pérez, L. E., Suárez, L. A. (2011). *Evaluación del efecto sombra en la producción de café - Coffea arabica L. - dentro de un sistema agroforestal tradicional con árboles en Las Minas, El Paraíso, Honduras* [Tesis de pregrado, Zamorano]. Biblioteca Digital Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/449>
- Pinzón, A. (2010). *Edafología*. Editorial Académica Española.
- Quiroga, A., y Funaro, D. (2004). Materia orgánica. Factores que condicionan su utilización como indicador de calidad en Molisoles, de las Regiones Semiárida y Subhúmeda Pampeana. *Actas*, 476.
- Rapidel, B., Allinne, C., Cerdán, C., Meylan, L., Elias de Melo, V. F. y Avelino, J. (2015). Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales. En F. Montagnini, E. Somarriba, E. Murgueitio, H. Fassola y B. Eibl (Eds.), *Sistemas agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (pp. 5-20). CIPAV.
- Rodríguez, C., Olmos, D. M., y Salazar V. H. (2009). *Paquete tecnológico para el cultivo de café orgánico en el Estado de Colima*. Gobierno del Estado Libre y Soberano de Colima.

- Rosas, J., Escamilla, E., y Ruiz, O. (2008). Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoamericana*, 26(4), 375-384.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., y Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Facultad de Agronomía Universidad de la República.
- Sánchez, P. A., Palm, Ch. A., & Buol, S. W. (2003). Fertility Capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114(3-4), 157-185.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00040-5)
- Sánchez-Marañón, M., Soriano, M., Delgado, G., & Delgado, R. (2002). Soil quality in mediterranean mountain environments. Effects of land use change. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), 948-958. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9480>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2012). *Subíndice de Uso Sustentable del Suelo - Metodología de Cálculo*. FAO-SAGARPA.
- Shukla, M. K., Lal, R., & Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 194-204.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>
- Silva, A. (2003). *La materia orgánica del suelo*. Notas. Técnicas N° 16. Facultad de Agronomía.
- Singer, M. J., & Ewing, S. (2000). Soil Quality. En M. E. Sumner (Ed.), *Handbook of Soil Science* (pp. 271-298). CRC Press.
- Thériez, M. (2015). *Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica*. CIRAD.
- Tully, K. L., Lawrence, D., & Scanlon, T. M. (2012). More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 161, 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.08.002>
- Tully, K. L., Wood, S. A., & Lawrence, D. (2013). Fertilizer type and species composition affect leachate nutrient concentrations in coffee agroecosystems. *Agroforestry Systems*, 87(5), 1083-1100. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9622-0>
- United States Department of Agriculture. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. USDA.
- United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. (2011). *Soil quality indicators. Soil electrical conductivity*. USDA.

- Van Den Berg, R., Denneman, C. A. J., & Roels, J. M. (1993). Risk assessment of contaminated soil: Proposals for adjusted, toxicologically based Dutch soil clean-up criteria. En F. Arendt, G. J. Annokké, R. Bosman y W. J. Van Den Brink (Eds.), *Contaminated Soil'93* (pp. 349-364). Springer.
- Velásquez, E. (2004). *Bioindicadores de calidad de suelo basados en las comunidades de macrofauna y su relación con características funcionales del suelo* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia].
- Villarreal-Núñez, J., Pla-Sentis, I., Agudo-Martínez, L., Villaláz-Perez, J., Rosales, F., y Pocasangre, L. (2013). Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 301-315.
- Volveré, B., y Amézquita, E. (2009). Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta Agronómica*, 58(1), 35-39.
- Wilson, M. G., Tasi, H., Garciarena, N., Indelángelo, N. Y., y Sasal, M. C. (2008). *Indicadores de calidad de suelo*. INTA.

## **ANEXOS**

**Anexo 1.** Propiedades físicas y químicas como indicadores de la calidad de suelos y rangos para su interpretación.

**Tabla 1.** Propiedades físicas como indicadores de la calidad de los suelos.

<b>Propiedades</b>	<b>Relaciones con la condiciones y funciones de los suelos</b>
Textura	Retener y transportar el agua y compuestos químicos; erosión de los suelos
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces	Estimar la productividad potencial y la erosión
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lavado; productividad y erosividad
Capacidad de retención de agua	Relación con la retención del agua, transporte, y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 2.** Propiedades químicas como indicadores de la calidad de los suelos.

<b>Propiedades</b>	<b>Relaciones con las condiciones y funciones de los suelos</b>
Materia orgánica (N y C total)	Definen la fertilidad de los suelos; estabilidad; erosión
pH	Define las actividades químicas y biológicas
Conductividad eléctrica	Define las actividades vegetales y microbianas
P, N, y K extractables	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de la calidad ambiental

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 3.** Rangos para la interpretación de la densidad aparente y el crecimiento radicular, basados en la textura del suelo.

<b>Textura</b>	<b>Ideal (g cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Aceptable (g cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Puede afectar el crecimiento radicular (g cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Restringe el crecimiento radicular (g cm<sup>-3</sup>)</b>
Arena, areno-franco	Dap < 1,6	1,6 ≤ Dap < 1,69	1,69 ≤ Dap < 1,80	Dap > 1,80
Franco-arenosa, franco	Dap < 1,4	1,4 ≤ Dap < 1,63	1,63 ≤ Dap < 1,80	Dap > 1,80
Franco-arcilla-arenosa, franco-arcillosa	Dap < 1,4	1,4 ≤ Dap < 1,60	1,60 ≤ Dap < 1,75	Dap > 1,75
Limosa	Dap < 1,3	1,3 ≤ Dap < 1,60	1,60 ≤ Dap < 1,75	Dap > 1,75
Franco-limosa, franco-arcillo-limosa	Dap < 1,4	1,4 ≤ Dap < 1,55	1,55 ≤ Dap < 1,65	Dap > 1,65
Arcillo-arenosa, arcillo-limosa	Dap < 1,1	1,1 ≤ Dap < 1,39	1,39 ≤ Dap < 1,58	Dap > 1,58
Arcillosa (>45% arcilla)	Dap < 1,1	1,1 ≤ Dap < 1,39	1,39 ≤ Dap < 1,47	Dap > 1,47

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 4.** Rangos para la interpretación del pH (relación 2:1).

<b>Clasificación</b>	<b>pH</b>
Fuertemente ácido	pH < 5,0
Moderadamente ácido	5,0 ≤ pH < 6,5
Neutro	6,5 ≤ pH < 7,3
Medianamente alcalino	7,3 ≤ pH < 8,5
Fuertemente alcalino	pH ≥ 8,5

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 5.** Rangos interpretativos para la conductividad eléctrica (CE).

<b>CE (dS.m<sup>-1</sup>) a 25 °C</b>	<b>Efectos sobre el suelo</b>
CE < 1,0	Efectos despreciables de la salinidad
1,0 ≤ CE < 2,0	Suelo muy ligeramente salino
2,0 ≤ CE < 4,0	Suelo moderadamente salino
4,0 ≤ CE < 8,0	Suelo salino
8,0 ≤ CE < 16,0	Suelo fuertemente salino
CE ≥ 16,0	Suelo muy fuertemente salino

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 6.** Rangos interpretativos para el contenido de materia orgánica (%).

<b>Clasificación</b>	<b>% MO</b>
Muy bajo	MO < 0,5
Bajo	0,5 ≤ MO < 1,5
Medio	1,5 ≤ MO < 3,5
Alto	3,5 ≤ MO < 6,0

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 7.** Rangos para la interpretación del contenido de nitrógeno (N) total.

<b>Clasificación</b>	<b>% N total</b>
Muy bajo	N < 0,05
Bajo	0,05 ≤ N < 0,10
Medio	0,10 ≤ N < 0,15
Alto	0,15 ≤ N < 0,25
Muy alto	N ≥ 0,25

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 8.** Rangos para la interpretación del fósforo (P) disponible.

<b>Nivel</b>	<b>P (mg.kg<sup>-1</sup>)</b>
Muy bajo	P ≤ 5
Bajo	5,1 ≤ P ≤ 15
Medio	15,1 ≤ P ≤ 30
Alto	30,1 ≤ P ≤ 40
Muy Alto	P ≥ 40,1

Fuente: Bazán (1996).

**Tabla 9.** Rangos para la interpretación del calcio (Ca) intercambiable.

<b>Clase</b>	<b>Ca (Cmol<sup>(+)</sup>.kg<sup>-1</sup>)</b>
Muy baja	Ca < 2
Baja	2 ≤ Ca < 5
Media	5 ≤ Ca < 10
Alta	Ca ≥ 10

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 10.** Rangos para la interpretación del magnesio (Mg) intercambiable.

<b>Clase</b>	<b>Mg (Cmol<sup>(+)</sup>.kg<sup>-1</sup>)</b>
Muy baja	Mg < 0,5
Baja	0,5 ≤ Mg < 1,3
Media	1,3 ≤ Mg < 3,0
Alta	Mg ≥ 3,0

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 11.** Rangos para la interpretación del sodio (Na) intercambiable.

<b>Clase</b>	<b>Na (Cmol<sup>(+)</sup>.kg<sup>-1</sup>)</b>
Muy bajo	0,0 ≤ Na < 0,3
Bajo	0,3 ≤ Na < 0,6
Normal	0,6 ≤ Na < 1,0
Alto	1,0 ≤ Na < 1,5
Muy alto	Na ≥ 1,5

Fuente: SAGARPA (2012).

**Tabla 12.** Rangos para la interpretación de la CIC.

<b>Clase</b>	<b>CIC (Cmol<sup>(+)</sup>.kg<sup>-1</sup>)</b>
Muy alta	CIC ≥ 40
Alta	25 ≤ CIC < 40
Media	15 ≤ CIC < 25
Baja	5 ≤ CIC < 15
Muy baja	CIC < 5

Fuente: SAGARPA (2012).



**Anexo 3.** Cálculo del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica - I. macrophylla*, profundidad total de 0 - 40 cm.

**Tabla 27.** Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 1 *C. arabica - I. macrophylla*, profundidad de 0 - 40 cm, gradiente altitudinal 1 831 m s. n. m.

Gradiente altitudinal (m s. n. m.)	Promedio de los valores del parámetro densidad aparente normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro pH normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro conductividad eléctrica normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro materia orgánica normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro nitrógeno normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro fósforo normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro calcio normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro magnesio normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro sodio normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro CIC normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) $SUSS = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$
1 831	0.48	0.83	0.97	0.11	0.04	0.32	0.81	0.92	1.67	0.29	0.64

**Tabla 28.** Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 2 *C. arabica - I. macrophylla*, profundidad de 0 - 40 cm, gradiente altitudinal 1 920 m s. n. m.

Gradiente altitudinal (m s. n. m.)	Promedio de los valores del parámetro densidad aparente normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro pH normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro conductividad eléctrica normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro materia orgánica normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro nitrógeno normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro fósforo normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro calcio normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro magnesio normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro sodio normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro CICe normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) $SUSS = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$
1 920	0.44	-0.32	0.96	0.20	0.15	0.44	0.22	0.21	1.73	-0.11	0.39

**Tabla 29.** Subíndice de Uso Sustentable del Suelo para el sistema agroforestal 3 *C. arabica - I. macrophylla*, profundidad de 0 - 40 cm, gradiente altitudinal 2 046 m s. n. m.

Gradiente altitudinal (m s. n. m.)	Promedio de los valores del parámetro densidad aparente normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro pH normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro conductividad eléctrica normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro materia orgánica normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro nitrógeno normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro fósforo normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro calcio normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro magnesio normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro sodio normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Promedio de los valores del parámetro CICe normalizado (P) $P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$	Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) $SUSS = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$
2 046	0.47	-0.09	0.98	0.11	0.07	0.32	0.31	0.32	1.68	-0.05	0.41

**Anexo 4.** Calidad del suelo de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*, mediante la aplicación del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), como base para la gestión sostenible de los suelos.

**Tabla 30.** Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 1 (1 831 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm).

Gradiente altitudinal (m s. n. m.)	Profundidad del suelo					
	0 - 10 cm		10 - 40 cm		0 - 40 cm	
	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo
1 831	0.68	Sensible	0.61	Marginal	0.64	Marginal

**Tabla 31.** Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 2 (1 920 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm).

Gradiente altitudinal (m s. n. m.)	Profundidad del suelo					
	0 - 10 cm		10 - 40 cm		0 - 40 cm	
	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo
1 920	0.43	Pobre	0.36	Pobre	0.39	Pobre

**Tabla 32.** Calidad del suelo para la gradiente altitudinal 3 (2 046 m s. n. m.), profundidades de 0 - 10 cm, 10 - 40 cm y total (0 - 40 cm).

Gradiente altitudinal (m s. n. m.)	Profundidad del suelo					
	0 - 10 cm		10 - 40 cm		0 - 40 cm	
	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo
2 046	0.47	Marginal	0.36	Pobre	0.41	Pobre

**Tabla 33.** Calidad del suelo para la profundidad de 0 - 10 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente.

Profundidad	Gradiente altitudinal					
	1 831 m s. n. m.		1 920 m s. n. m.		2 046 m s. n. m.	
	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo
0 - 10 cm	0.68	Sensible	0.43	Pobre	0.47	Marginal

**Tabla 34.** Calidad del suelo para la profundidad de 10 - 40 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente.

Profundidad	Gradiente altitudinal					
	1 831 m s. n. m.		1 920 m s. n. m.		2 046 m s. n. m.	
	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo
10 - 40 cm	0.61	Marginal	0.36	Pobre	0.36	Pobre

**Tabla 35.** Calidad del suelo para la profundidad de 0 - 40 cm en las tres gradientes altitudinales (1 831, 1 920 y 2 046 m s. n. m.), respectivamente.

Profundidad	Gradiente altitudinal					
	1 831 m s. n. m.		1 920 m s. n. m.		2 046 m s. n. m.	
	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo	SUSS	Calidad del suelo
0 - 40 cm	0.64	Marginal	0.39	Pobre	0.41	Pobre

Anexo 5. Análisis de suelos de las de tres gradientes altitudinales con sistemas agroforestales de *C. arabica* - *I. macrophylla*.

Tabla 36. Análisis de suelos para la gradiente altitudinal 1 (1 831 m s. n. m.).



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

analisisdesuelosunas@hotmail.com



# ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: GUIADO LALE MARVIN GABRIEL					SECTOR MACHICURA										SAF 1																			
N°	DATOS				ANÁLISIS MECÁNICO			pH	CE	M.O.	N	P	K	CIC	CAMBIABLES						CICe	%	%	%										
	CODIGO DEL LAB.	Prof. (cm)	Punto	Dap (g/cc)	Arena	Arcilla	Limo								Textura	2:1	ds/cm	%	%	disponible					Ca	Mg	K	Na	Al	H	Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al	
					ppm	ppm	cmol(+)/kg													cmol(+)/kg														
41	S01887-41	0 - 10	1	1.17	65	22	13	Franco Arcillo Arenoso	5.58	0.214	2.27	0.11	4.24	105	8.75	6.91	0.99	0.78	0.074	0.00	0.00	--	100	0	0									
42	S01887-42	10 - 40	1	1.12	11	62	27	Arcilloso	6.04	0.124	1.10	0.06	2.15	101	7.44	5.80	0.97	0.60	0.065	0.00	0.00	--	100	0	0									
43	S01887-43	0 - 10	2	1.09	59	26	15	Franco Arcillo Arenoso	5.70	0.223	2.27	0.11	4.08	111	9.92	7.54	0.99	1.29	0.096	0.00	0.00	--	100	0	0									
44	S01887-44	10 - 40	2	1.05	35	46	19	Arcilloso	6.27	0.072	0.90	0.04	2.07	84	8.04	6.36	0.80	0.81	0.078	0.00	0.00	--	100	0	0									
45	S01887-45	0 - 10	3	1.12	45	34	21	Franco Arcilloso	5.57	0.177	1.00	0.05	5.60	108	9.14	7.12	0.97	0.97	0.078	0.00	0.00	--	100	0	0									
46	S01887-46	10 - 40	3	1.08	41	36	23	Franco Arcilloso	5.77	0.146	0.57	0.03	3.03	90	7.65	6.14	0.96	0.49	0.065	0.00	0.00	--	100	0	0									
47	S01887-47	0 - 10	4	1.13	53	34	13	Franco Arcillo Arenoso	6.26	0.162	2.67	0.13	4.40	137	10.29	7.54	1.00	1.67	0.078	0.00	0.00	--	100	0	0									
48	S01887-48	10 - 40	4	1.07	27	52	21	Arcilloso	6.66	0.405	0.64	0.03	1.83	122	8.83	6.24	0.94	1.58	0.065	0.00	0.00	--	100	0	0									
49	S01887-49	0 - 10	5	1.12	45	34	21	Franco Arcilloso	6.44	0.193	2.41	0.12	11.06	131	9.94	8.01	1.03	0.84	0.057	0.00	0.00	--	100	0	0									
50	S01887-50	10 - 40	5	1.09	27	46	27	Arcilloso	6.55	0.097	0.30	0.02	2.15	109	8.84	7.11	1.02	0.66	0.048	0.00	0.00	--	100	0	0									
51	S01887-51	0 - 10	6	1.1	53	30	17	Franco Arcillo Arenoso	6.22	0.166	1.87	0.09	9.69	106	6.67	5.18	0.61	0.82	0.057	0.00	0.00	--	100	0	0									
52	S01887-52	10 - 40	6	1.08	15	46	39	Arcilloso	6.40	0.121	0.35	0.02	4.56	101	4.21	3.58	0.26	0.33	0.043	0.00	0.00	--	100	0	0									
53	S01887-53	0 - 10	7	1.12	31	36	33	Franco Arcilloso	6.59	0.263	1.19	0.06	5.60	141	9.63	6.57	1.08	1.93	0.052	0.00	0.00	--	100	0	0									
54	S01887-54	10 - 40	7	1.08	25	26	49	Franco	6.65	0.078	0.35	0.02	2.07	131	8.28	5.36	1.04	1.84	0.048	0.00	0.00	--	100	0	0									
55	S01887-55	0 - 10	8	1.14	45	34	21	Franco Arcilloso	6.44	0.113	1.50	0.08	6.48	138	9.41	6.37	0.98	2.01	0.057	0.00	0.00	--	100	0	0									
56	S01887-56	10 - 40	8	1.09	33	44	23	Arcilloso	6.50	0.048	0.70	0.03	3.36	126	5.42	3.69	0.43	1.25	0.039	0.00	0.00	--	100	0	0									
57	S01887-57	0 - 10	9	1.18	57	32	11	Franco Arcillo Arenoso	5.98	0.223	1.60	0.08	6.16	103	9.20	6.96	1.04	1.08	0.122	0.00	0.00	--	100	0	0									
58	S01887-58	10 - 40	9	1.06	43	36	21	Franco Arcilloso	6.36	0.071	0.87	0.04	3.28	82	7.30	5.77	1.03	0.44	0.061	0.00	0.00	--	100	0	0									
59	S01887-59	0 - 10	10	1.09	63	22	15	Franco Arcillo Arenoso	6.27	0.173	2.54	0.13	4.72	115	8.97	6.69	1.10	1.11	0.065	0.00	0.00	--	100	0	0									
60	S01887-60	10 - 40	10	1.06	51	26	23	Franco Arcillo Arenoso	6.60	0.083	1.07	0.05	2.39	102	7.41	5.35	1.05	0.95	0.057	0.00	0.00	--	100	0	0									

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
 RECIBO 001 N° 001-0665040  
 TINGO MARIA, 01 DE DICIEMBRE 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
 Tingo María

*Hugo Alfredo Huamani Yupanqui*  
 Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI  
 Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Tabla 37. Análisis de suelos para la gradiente altitudinal 2 (1 920 m s. n. m.).


SOLICITANTE: GUISADO LALE MARVIN GABRIEL				SECTOR GRAMAZU										SAF 2																			
N°	DATOS				ANALISIS MECANICO			pH	CE	M.O.	N	P	K	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	%	%	%									
	CODIGO DEL LAB.	Prof. (cm)	Punto	Dap (g/cc)	Arena	Arcilla	Limo								Textura	2:1	dS/cm	%	%	disponible					Ca	Mg	K	Na	Al	H	Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al
				%	%	%								ppm	ppm																		
1	S01887-1	0 - 10	1	1.13	69	16	15	Franco Arenoso	4.42	0.237	2.54	0.13	5.76	84	----	1.38	0.16	0.23	0.017	1.57	0.15	3.50	51	49	45								
2	S01887-2	10 - 40	1	1.06	65	20	15	Franco Arenoso	4.53	0.239	0.67	0.03	2.87	57	----	1.04	0.12	0.15	0.016	1.40	0.05	2.78	48	52	50								
3	S01887-3	0 - 10	2	1.14	69	16	15	Franco Arenoso	4.62	0.186	2.07	0.10	8.73	31	----	2.15	0.29	0.08	0.017	1.31	0.46	4.30	59	41	30								
4	S01887-4	10 - 40	2	1.11	69	16	15	Franco Arenoso	4.77	0.122	1.20	0.06	4.24	28	----	1.56	0.16	0.07	0.016	1.21	0.08	3.09	58	42	39								
5	S01887-5	0 - 10	3	1.13	69	16	15	Franco Arenoso	4.59	0.225	3.48	0.17	9.93	54	----	2.17	0.26	0.14	0.017	0.77	1.40	4.74	54	46	16								
6	S01887-6	10 - 40	3	1.12	69	16	15	Franco Arenoso	4.94	0.052	2.14	0.11	5.20	22	----	1.33	0.13	0.05	0.016	0.76	0.31	2.59	59	41	29								
7	S01887-7	0 - 10	4	1.15	69	16	15	Franco Arenoso	4.56	0.152	2.34	0.12	10.34	48	----	2.21	0.25	0.13	0.021	1.19	0.40	4.19	62	38	28								
8	S01887-8	10 - 40	4	1.08	69	16	15	Franco Arenoso	4.66	0.073	1.67	0.08	3.36	34	----	0.98	0.13	0.07	0.012	0.75	0.02	1.95	61	39	38								
9	S01887-9	0 - 10	5	1.19	70	16	14	Franco Arenoso	4.90	0.203	3.74	0.19	6.89	78	----	4.12	0.65	0.17	0.018	0.74	0.03	5.72	87	13	13								
10	S01887-10	10 - 40	5	1.15	70	16	14	Franco Arenoso	4.96	0.116	2.87	0.14	4.48	34	----	1.55	0.19	0.06	0.013	0.67	0.01	2.49	73	27	27								
11	S01887-11	0 - 10	6	1.14	69	16	15	Franco Arenoso	4.45	0.434	2.74	0.14	6.64	73	----	2.29	0.24	0.14	0.011	1.40	0.45	4.53	59	41	31								
12	S01887-12	10 - 40	6	1.10	69	14	17	Franco Arenoso	4.57	0.172	2.07	0.10	6.08	29	----	1.39	0.13	0.09	0.009	1.39	0.37	3.37	48	52	41								
13	S01887-13	0 - 10	7	1.17	57	20	23	Franco Arenoso	4.30	0.278	1.20	0.06	5.44	51	----	1.38	0.13	0.14	0.013	2.03	1.21	4.90	34	66	41								
14	S01887-14	10 - 40	7	1.12	63	18	19	Franco Arenoso	4.31	0.143	0.33	0.02	4.08	30	----	0.97	0.10	0.08	0.012	1.98	0.97	4.12	28	72	48								
15	S01887-15	0 - 10	8	1.14	65	16	19	Franco Arenoso	4.10	0.235	1.94	0.10	5.36	61	----	1.24	0.12	0.16	0.014	2.07	1.06	4.67	33	67	44								
16	S01887-16	10 - 40	8	1.08	69	16	15	Franco Arenoso	4.50	0.101	1.07	0.05	4.88	27	----	0.88	0.10	0.06	0.011	1.40	0.45	2.90	36	64	48								
17	S01887-17	0 - 10	9	1.16	65	16	19	Franco Arenoso	4.25	0.342	3.41	0.17	9.21	86	----	1.33	0.13	0.17	0.010	1.79	0.40	3.82	43	57	47								
18	S01887-18	10 - 40	9	1.12	65	14	21	Franco Arenoso	4.34	0.238	1.20	0.06	6.64	43	----	0.96	0.12	0.07	0.009	0.78	1.38	3.32	35	65	24								
19	S01887-19	0 - 10	10	1.14	69	14	17	Franco Arenoso	4.11	0.255	2.21	0.11	4.80	86	----	1.17	0.13	0.20	0.012	1.45	0.69	3.66	41	59	40								
20	S01887-20	10 - 40	10	1.13	65	16	19	Franco Arenoso	4.62	0.090	0.47	0.02	4.48	50	----	0.93	0.12	0.14	0.010	0.67	0.71	2.58	46	54	26								

MUESTREO POR EL SOLICITANTE  
RECIBO 001 N° 001-0665040  
TINGO MARIA, 01 DE DICIEMBRE 2022


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
Tingo Maria

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI  
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Tabla 38. Análisis de suelos para la gradiente altitudinal 3 (2 046 m s. n. m.).




**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
 Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531  
 Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología  
[analisisdesuelosunas@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosunas@hotmail.com)



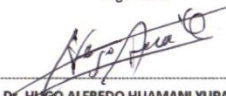
## ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: GUIADO LALE MARVIN GABRIEL					SECTOR ZIPIZU								SAF 3												
N°	DATOS				ANÁLISIS MECÁNICO			pH	CE	M.O.	N	P		K	CIC	CAMBIABLES			Cmol(+)/kg			CICe	% Bas. Camb.	% Ac. Camb.	% Sat. Al
	CODIGO DEL LAB.	Prof. (cm)	Punto	Dap (g/cc)	Arena	Arcilla	Limo					Textura	2:1			dS/cm	%	%	ppm	ppm	Ca				
21	S01887-21	0 - 10	1	1.12	65	22	13	Franco Arcillo Arenoso	4.97	0.314	1.47	0.07	3.28	86	---	4.63	0.76	0.27	0.061	0.34	0.10	6.16	93	7	6
22	S01887-22	10 - 40	1	1.1	59	26	15	Franco Arcillo Arenoso	4.99	0.155	1.06	0.05	2.79	75	---	2.55	0.33	0.21	0.052	1.05	0.97	5.16	61	39	20
23	S01887-23	0 - 10	2	1.14	69	22	9	Franco Arcillo Arenoso	4.66	0.158	1.60	0.08	6.56	84	---	2.18	0.26	0.22	0.057	1.11	0.70	4.53	60	40	24
24	S01887-24	10 - 40	2	1.08	65	26	9	Franco Arcillo Arenoso	4.73	0.066	0.20	0.01	3.11	44	---	1.31	0.17	0.11	0.048	1.19	0.60	3.44	48	52	35
25	S01887-25	0 - 10	3	1.16	75	22	3	Franco Arcillo Arenoso	4.92	0.180	2.27	0.11	6.24	60	---	4.42	0.57	0.14	0.043	0.85	0.20	6.23	83	17	14
26	S01887-26	10 - 40	3	1.02	63	22	15	Franco Arcillo Arenoso	5.01	0.051	0.47	0.02	4.08	27	---	1.63	0.19	0.08	0.039	0.33	0.36	2.63	74	26	13
27	S01887-27	0 - 10	4	1.15	69	16	15	Franco Arenoso	4.31	0.194	1.74	0.09	4.40	45	---	1.87	0.18	0.13	0.065	2.19	0.52	4.95	45	55	44
28	S01887-28	10 - 40	4	1.11	65	16	19	Franco Arenoso	4.42	0.083	1.14	0.06	3.68	37	---	1.02	0.12	0.10	0.043	2.18	0.13	3.60	36	64	61
29	S01887-29	0 - 10	5	1.17	69	16	15	Franco Arenoso	4.73	0.088	3.21	0.16	5.84	38	---	2.87	0.33	0.09	0.052	1.87	0.10	5.31	63	37	35
30	S01887-30	10 - 40	5	1.12	69	16	15	Franco Arenoso	4.97	0.063	1.87	0.09	2.79	20	---	1.24	0.15	0.05	0.043	1.70	0.03	3.22	46	54	53
31	S01887-31	0 - 10	6	1.09	69	22	9	Franco Arcillo Arenoso	5.04	0.083	2.14	0.11	5.36	36	---	3.15	0.42	0.09	0.057	0.85	0.40	4.97	75	25	17
32	S01887-32	10 - 40	6	1.05	59	28	13	Franco Arcillo Arenoso	5.02	0.030	0.84	0.04	2.55	32	---	1.32	0.15	0.08	0.048	1.28	0.10	2.97	54	46	43
33	S01887-33	0 - 10	7	1.12	65	26	9	Franco Arcillo Arenoso	5.21	0.075	1.40	0.07	7.77	95	---	4.58	0.64	0.30	0.061	0.68	0.20	6.46	86	14	11
34	S01887-34	10 - 40	7	1.08	57	28	15	Franco Arcillo Arenoso	4.84	0.057	1.00	0.05	3.20	39	---	1.33	0.16	0.09	0.043	1.26	0.12	3.00	54	46	42
35	S01887-35	0 - 10	8	1.14	69	22	9	Franco Arcillo Arenoso	5.04	0.095	1.60	0.08	6.48	43	---	5.02	0.80	0.14	0.070	0.85	0.10	6.98	86	14	12
36	S01887-36	10 - 40	8	1.06	59	28	13	Franco Arcillo Arenoso	4.95	0.066	0.87	0.04	3.28	38	---	2.89	0.32	0.10	0.052	0.43	0.10	3.88	86	14	11
37	S01887-37	0 - 10	9	1.13	69	16	15	Franco Arenoso	4.89	0.134	1.20	0.06	12.66	79	---	2.98	0.34	0.23	0.048	1.15	0.25	5.00	72	28	23
38	S01887-38	10 - 40	9	1.11	65	16	19	Franco Arenoso	4.73	0.055	0.13	0.01	9.29	49	---	1.87	0.15	0.15	0.043	1.45	0.29	3.95	56	44	37
39	S01887-39	0 - 10	10	1.11	69	22	9	Franco Arcillo Arenoso	4.95	0.083	1.17	0.06	4.96	68	---	2.25	0.28	0.17	0.096	1.02	0.50	4.31	65	35	24
40	S01887-40	10 - 40	10	1.05	55	32	13	Franco Arcillo Arenoso	4.83	0.042	0.31	0.02	3.11	40	---	1.32	0.15	0.14	0.078	1.90	0.26	3.85	44	56	49


MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
 RECIBO 001 N° 001-0665040  
 TINGO MARIA, 01 DE DICIEMBRE 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
 Tingo María



Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI  
 Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



**Anexo 6.** Panel fotográfico de la etapa de campo.



**Figura 19.** Apertura de calicata de 50x50x50 cm para muestrear suelos a 0-10 y 10-40 cm de profundidad, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.



**Figura 20.** Muestreando suelos con pala recta a 10 cm de profundidad, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.



**Figura 21.** Toma de lectura de las profundidades para el muestreo de suelos, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.



**Figura 22.** Toma y almacenamiento de la muestra de suelos a una profundidad de 0-10 cm, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.



**Figura 23.** Lectura de la profundidad para realizar el muestreo de suelos, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.



**Figura 24.** Lectura de la profundidad para realizar el muestreo de suelos, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen (1).



**Figura 25.** Lectura de la profundidad para realizar el muestreo de suelos, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen (2).



**Figura 26.** Sistema agroforestal *C. arabica* - *I. macrophylla*, sector Gramazú, CC. NN. Tsachopen.



**Figura 27.** Lectura de la profundidad para realizar el muestreo de suelos, sector Machicura, caserío Pusapno.



**Figura 28.** Apertura de calicata de 50x50x50 cm para muestrear suelos a 0-10 y 10-40 cm de profundidad, sector Machicura, caserío Pusapno.



**Figura 29.** Preparando el área superficial para el muestreo de suelos, sector Machicura, caserío Pusapno.

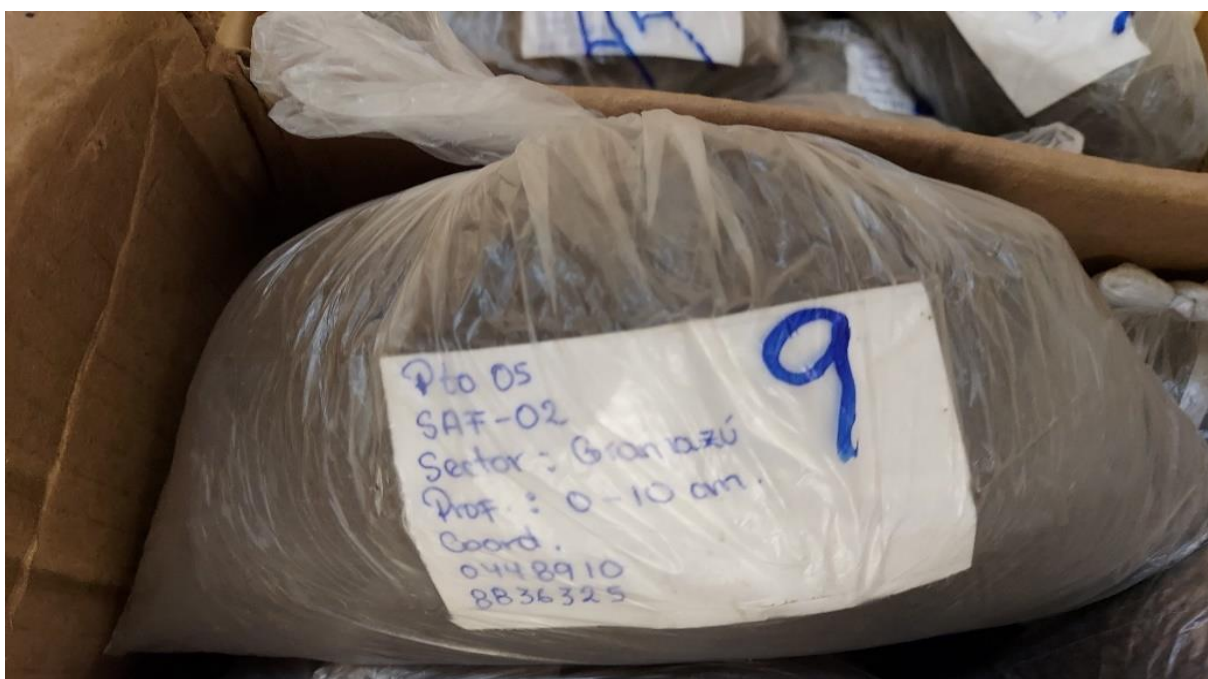


**Figura 30.** Sistema agroforestal *C. arabica* - *I. macrophylla*, sector Machicura, caserío Pusapno.

**Anexo 7.** Panel fotográfico de la etapa de laboratorio.



**Figura 31.** Entrega de las muestras de suelo al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.



**Figura 32.** Rotulado de las muestras de suelos recolectadas en los sistemas agroforestales evaluados.



**Figura 33.** Calibración de la espectrometría de absorción atómica, Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.



**Figura 34.** Cuantificación de la concentración de los micro y macroelementos químicos, Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.



**Figura 35.** Determinación de los macro y micronutrientes del suelo de los sistemas agroforestales *C. arabica* - *I. macrophylla*.



**Figura 36.** Determinando la textura de las muestras de suelo de los sistemas agroforestales *C. arabica* - *I. macrophylla*.



**Figura 37.** Determinación de los macro y micronutrientes del suelo de los sistemas agroforestales *C. arabica* - *I. macrophylla* (1).



**Figura 38.** Determinando el pH del suelo, Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.



**Figura 39.** Determinación de los macro y micronutrientes del suelo de los sistemas agroforestales *C. arabica* - *I. macrophylla* (2).



**Figura 40.** Determinación de los macro y micronutrientes del suelo de los sistemas agroforestales *C. arabica* - *I. macrophylla* (3).