UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

ÍNDICE DE CALIDAD DEL SUELO BAJO DISTINTOS USOS DE LA TIERRA EN LA PARROQUIA FÁTIMA, PROVINCIA DE PASTAZA

AUTOR(ES):

Mayra Paola Sarango Abad
Grace Vanesa López Gordon

DOCENTE - TUTOR:

PhD. Carlos Alfredo Bravo Medina

Puyo - Pastaza - Ecuador

2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	Si cumple con lo solicitado.
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	Si Cumple con lo solicitado.
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	19.0 / 20	Si cumple con lo solicitado, aunque se considera innecesario disponer de forma explicita la palabra objetivo.
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	12.0 / 15	Si cumple, pero se recomienda acatar las recomendaciones de la guía metodológica en cuanto al número de páginas máximo para la presentación del artículo.
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	12.0 / 15	

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	22.0 / 25	Si cumple en parte, aunque se recomienda presentar acorde a las directrices de la Guía metodológica las figuras.
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	Si Cumple con lo solicitado.
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	Si Cumple con lo solicitado.
VALORACIÓN TOTAL	90	NOVENTA

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	90

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
SANTIAGO HOMERO
CUICHAN PAUCAR

SANTIAGO HOMERO CUICHAN PAUCAR (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 12 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	Cumple con los criterios de evaluación
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	Cumple con los criterios de evaluación
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20.0 / 20	Cumple con los criterios de evaluación
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15.0 / 15	Cumple con los criterios de evaluación
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	15.0 / 15	Cumple con los criterios de evaluación

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	25.0 / 25	Cumple con los criterios de evaluación
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	Cumple con los criterios de evaluación
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	Cumple con los criterios de evaluación
VALORACIÓN TOTAL	100	CIEN

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	100

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
SEGUNDO BOLIER
TORRES NAVARRETE

SEGUNDO BOLIER TORRES NAVARRETE (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 13 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

Firmado electrónicamente por:
CARLOS ALFREDO BRAVO MEDINA

Document Information

Analyzed document	Índice de calidad del suelo bajo distintos usos de la tierra en la parroquia Fátima, provincia de Pastaza (D173394074)
Submitted	9/4/2023 3:54:00 AM
Submitted by	
Submitter email	cbravo@uea.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	cbravo.uea@analysis.urkund.com

Sources included in the report

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / Tesis final genesis y hamilton (urkund).docx
Document Tesis final genesis y hamilton (urkund).docx (D63151056)
Submitted by: hamiltonazogue@gmail.com
Receiver: cbravo.uea@analysis.urkund.com
2

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / Tesis Maestría Urkund Danilo Sarabia Guevara.doc
Document Tesis Maestría Urkund Danilo Sarabia Guevara.doc (D148463337)
Submitted by: cbravo@uea.edu.ec
Receiver: cbravo.uea@analysis.urkund.com
1

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO BAJO DISTINTOS USOS DE LA TIERRA MEDIANTE PARÁMETROS AMBIENTALES EN LA COMUNI DAD BOAYACU.pdf
Document EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO BAJO DISTINTOS USOS DE LA TIERRA MEDIANTE PARÁMETROS AMBIENTALES EN LA COMUNI DAD BOAYACU.pdf (D35276719)
Submitted by: cbravo@uea.edu.ec
Receiver: cbravo.uea@analysis.urkund.com
1

TESIS-LOOR-ZAMBRANO.docx
Document TESIS–LOOR–ZAMBRANO.docx (D16286201)
1

Entire Document

Índice de calidad del suelo bajo distintos usos de la tierra en la parroquia Fátima, provincia de Pastaza
Soil quality index under different land uses in the Fátima parish, Pastaza province
Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Vida, Carrera de Ingeniería Ambiental (1)

Índice de calidad del suelo bajo distintos usos de la tierra en la parroquia Fátima, provincia de Pastaza

Soil quality index under different land uses in the Fátima parish, Pastaza province

Grace Vanesa López Gordon [1]
amb2016096@uea.edu.ec

Mayra Paola Sarango Abad 2[1]
amb2017254@uea.edu.ec

Carlos Alfredo Bravo Medina, Ph.D.[2]
cbravo@uea.edu.ec

Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Vida, Carrera de Ingeniería Ambiental (1)

Resumen

La calidad del suelo puede ser afectada por diferentes factores, en especial por el cambio de uso de suelo, lo cual es de gran relevancia en la región amazónica ecuatoriana que está sujeta a continuos procesos de deforestación y avance de la frontera agrícola. Este estudio evaluó la influencia de diferentes tipos de uso del suelo en la calidad del suelo utilizando un índice integrado de calidad del suelo (ICS) con un conjunto mínimo de indicadores, basado en muestras representativas de suelo, 4 tipos de uso de la tierra y en un paisaje productivo en la provincia de Pastaza. Los tipos de uso de la tierra evaluados fueron: Caña de azúcar (CA), Sistema Agrosilvopastoril (SASP) y Sistema silvopastoril Maderable (SSPM) y Bosque secundario (BS). El tipo de uso de la tierra tuvo efectos significativos en las propiedades del suelo y, por lo tanto, en la calidad del suelo. El índice de calidad del suelo se desarrolló utilizando Da, relación Ca+Mg/K, MOS, tuvieron los valores de ponderación más altos (0,41), lo que indica que estos indicadores contribuyeron más al SQI final. El Índice de calidad de suelos (ICS) mostro diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los distintos usos de la tierra, estableciendo el siguiente orden: B (0.41) > SASP (0.40) > SSPM (0.34) > CA (0.33). Por tanto, los valores obtenidos son considerados de baja a moderada calidad resultando el bosque y los sistemas agroforestales como los de mayor calidad. El SQI aplicado se puede utilizar para evaluar el efecto de los cambios en el uso del suelo sobre la calidad del suelo en otros paisajes de la región amazónica ecuatoriana.

Palabras clave: *Uso de la tierra, calidad del suelo, indicadores, propiedades del suelo, Región Amazónica Ecuatoriana.*

Abstract

The quality of the soil can be affected by different factors, especially by the change in land use, which is of great relevance in the Ecuadorian Amazon region that is subject to continuous processes of deforestation and advance of the agricultural frontier. This study evaluated the influence of different types of land use on soil quality using an integrated soil quality index (ICS) with a minimum set of indicators, based on representative samples of soil, 4 types of land use, and in a productive landscape in the province of Pastaza. The types of land use evaluated were: Sugarcane (CA), Agrosilvopastoral System (SASP) and Timber Silvopastoral System (SSPM) and Secondary Forest (BS). The type of land use had significant effects on soil properties and therefore on soil quality. The soil quality index was developed using Da, Ca+Mg/K ratio, MOS, had the highest weighting values (0.41), indicating that these indicators contributed more to the final SQI. The Soil Quality Index (ICS) showed significant differences ($p<0.05$) between the different land uses, establishing the following order: B (0.41)>SASP (0.40)>SSPM (0.34)>CA (0.33). Therefore, the values obtained are considered of low to moderate quality, resulting in the forest and agroforestry systems as the highest quality. The applied SQI can be used to assess the effect of land use changes on soil quality in other landscapes in the Ecuadorian Amazon region.

Keywords: *Land use, soil quality, indicators, soil properties, Ecuadorian Amazon Region.*

1. INTRODUCCIÓN.

El suelo es uno de los recursos naturales que mantiene el delicado equilibrio entre los factores bióticos y abióticos del planeta (Llorente, 2017). Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo mantienen su fertilidad y permiten el adecuado desarrollo de las plantas, animales y el ser humano (Vargas-Machuca, 2001). En este sentido, la calidad del suelo se define como la capacidad de este medio para funcionar como un sistema vivo, lo que implica la adecuada productividad biológica y calidad ambiental (Doran y Safley, 1997). Sin embargo, el potencial productivo del suelo en la Amazonía ecuatoriana está siendo alterado por la deforestación, cambios en el uso y expansión de

la frontera agrícola (Bravo-Medina *et al.*, 2021).

La cuantificación de la calidad del suelo es un proceso complejo y no existe aún un consenso plenamente establecido en la sociedad científica. Debido a que las interrelaciones entre indicadores físicos, químicos y biológicos son complejos y el índice de calidad del suelo es muy variable entre distintas regiones, la evaluación de la calidad ha tenido varias propuestas que incluyen indicadores y parámetros edáficos. Sin embargo, varios métodos parecen coincidir que para calcular el índice de calidad se deben seguir tres pasos: 1) seleccionar los indicadores de una matriz de datos, 2) puntuar los indicadores y 3) clasificar los indicadores según su nivel de importancia relativa en función del tipo de suelo y los objetivos definidos para el uso de suelo. El conjunto mínimo de datos de indicadores y su importancia relativa varían en función del tipo de suelo. Para ponderar los indicadores existen varios métodos como PCA, análisis de sensibilidad, procesos analíticos jerárquicos (AHP), hasta los juicios de expertos (Mandal *et al.*, 2010).

La región amazónica ecuatoriana, es un territorio que ha sido caracterizado como biodiverso con inmensos recursos naturales y con una alta vocación para usos con Bosque (Nieto Cabrera y Caicedo Vargas, 2012). Sin embargo, a partir de su colonización, grandes áreas han sido sometidas a un proceso de deforestación intenso y un cambio hacia sistemas agrícolas y pecuarios que han generado un gran deterioro de sus recursos (suelo, agua, vegetación, biodiversidad) afectando su potencial productivo y su capacidad de proporcionar servicios ecosistémicos (Bravo *et al.*, 2015). En este contexto, de acuerdo al Plan de Desarrollo y Ordenamiento de la provincia de Pastaza (GAD Provincial de Pastaza, 2019), señala que la deforestación modifica la estructura de los ecosistemas tropicales. De este modo, de 1990 a 2008, la provincia de Pastaza pasó de tener 2’683,943 hectáreas de bosque primario a tener 2’612,823 hectáreas, es decir una disminución de 71,120 hectáreas (3951 hectáreas por año). Por el contrario, las áreas destinadas para actividades agropecuarias pasaron de 97,205 hectáreas a 205,470 hectáreas durante este periodo de tiempo, lo que indica una duplicación del área destinada a la agricultura. Una manera de conocer la influencia de las actividades humanas sobre el suelo es a través de determinar un índice de calidad del suelo.

A pesar de que es bien conocido que la deforestación y transformación del suelo hacia sistemas agrícolas, disminuye su calidad en diferentes regiones del mundo (Barrera León *et al.*, 2020; Davari *et al.*, 2020; Toledo *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018), estudios sobre la calidad en suelos amazónicos de la provincia de Pastaza, son requeridos para

comprender la influencia de los sistemas agroforestales sobre la calidad del mismo (Bravo-Medina *et al.*, 2021). Nuestra zona de estudio se ubica en la parroquia Fátima de la provincia de Pastaza en la región Amazónica del Ecuador.

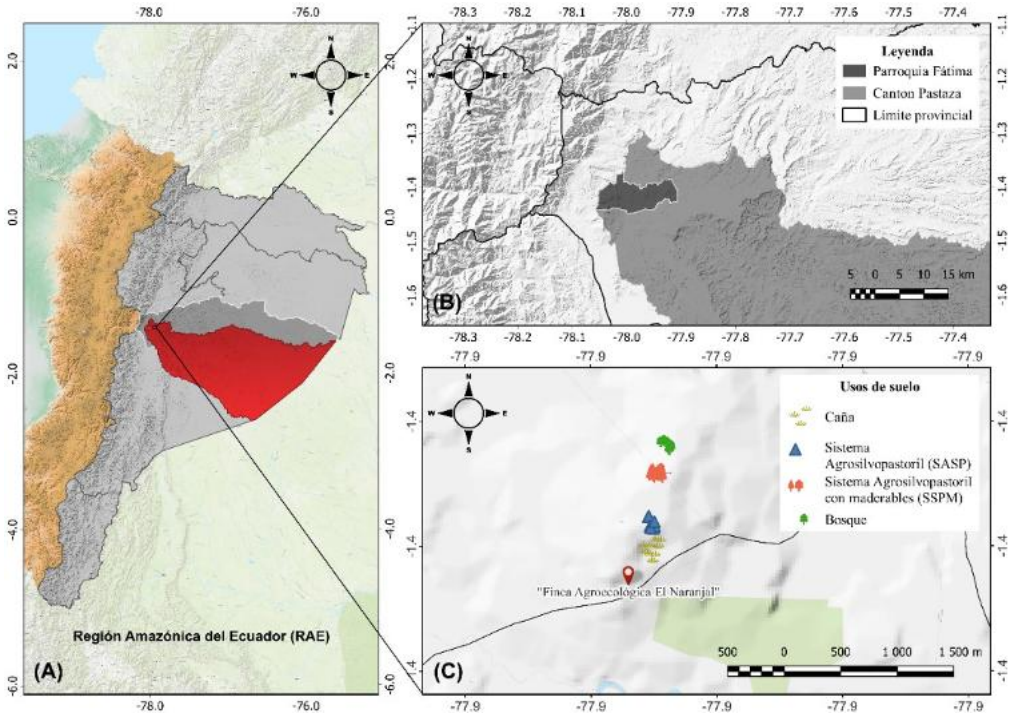
El objetivo general consistió en obtener un índice de calidad del suelo bajo distintos usos de la tierra, a través de indicadores físicos, químicos y biológicos, en la parroquia Fátima de la provincia de Pastaza. Además, se determinó la calidad física, química, biológica del suelo a través de sus propiedades.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El presente estudio se realizó en la Finca Agroecológica "El Naranjal", ubicado a 10 kilómetros al noreste de la ciudad de Puyo, en la parroquia Fátima, provincia de Pastaza (Figura 1). Comprende una elevación topográfica desde 960 a 1064 msnm y pendientes irregulares entre 12% a 25% (GAD Parroquial Fátima, 2015). El clima es categorizado como tropical mega término húmedo, con una temperatura media anual entre 18 a 24° C y humedad relativa mayor al 85%. La precipitación comprende un rango de 3000 a 5000 mm anuales, siendo abril hasta julio los meses de mayor precipitación (GAD Parroquial Fátima, 2015).

Figura 1. Localización geográfica de la Finca Agroecológica "El Naranjal". (A) Ubicación referencial de la Región Amazónica. (B) Ubicación de la Parroquia Fátima. (C) Ubicación de los usos de suelo en la zona de estudio.



Fuente: de los autores.

De acuerdo al Plan de Ordenamiento Territorial de la Parroquia Fátima (GAD Parroquial Fátima, 2015), el 34% del suelo en la parroquia corresponden a bosques naturales, es decir 2438.42 hectáreas, además el 55% (3962 hectáreas) corresponden a cobertura vegetal de pasto y especies forestales. Los suelos agrícolas perennes y no perennes representan el 2.44% (174.71 hectáreas).

La Finca Agroecológica cuenta con diversos usos de la tierra, debido a ser un área productiva, por tal razón, en la Tabla 1 se indican los usos de suelo seleccionados.

Tabla 1. Usos del suelo seleccionados en el área de estudio, Provincia de Pastaza, Región Amazónica del Ecuador.

Uso del suelo	Cultivo	Coordenadas WGS 84 – UTM, Zona 18 Sur	
		Latitud	Longitud
Cultivo de caña (CA)	Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)	174475.39	9843878.27
Sistema Agrosilvopastoril (SASP)	Pasto de forrajeo (*Cenchrus purpureus)*	174433.20	9844212.14
Sistema silvopastoril con maderables (SSPM)	Árboles maderables como chuncho (*Cedrelinga cateniformis),* Piwi (*Piptocona discolor),* Canelo (*Nectandra sp.)*	174509.05	9844570.00
Bosque	Gran biodiversidad y predominancia de especies como: Pambil (*Iriartea deltoidea),* Uva de monte (*Pouroma minor),* Piton *(Grias neuberthi),* Huarumo (*Cecropia fycifolia),* Sapote de monte (*Matisia),* Guadua (*Guadua angustifolia),*	174470.80	9844873.52

Fuente: de los autores.

Se recolectaron un promedio de 6 muestras por cada uso a distintas profundidades: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm. Las muestras se procesaron en laboratorio para obtener parámetros físicos como: porcentajes de arena, limo, arcilla, densidad aparente, saturación, porosidad de aireación, porosidad total, pH. Los parámetros químicos como nitrógeno intercambiable, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, concentración de bases intercambiables, boro, zinc, cobre, hierro y manganeso. Los parámetros biológicos corresponden a materia orgánica del suelo y producción de hojarasca.

La taxonomía de suelos en la parroquia Fátima corresponde a Inceptisoles. Estos se identifican por tener un pobre desarrollo y se consideran inmaduros. Se originan debido a la meteorización de materiales resistentes o ceniza volcánica. Por lo general, son suelos de textura limosa, franco-limoso, franco-arcilloso-limoso y se ubican a poca profundidad (GAD Parroquial Fátima, 2015).

El 95.6% de la extensión de la parroquia, tiene suelos con textura media y un pH ligeramente ácido entre los rangos 4.5 – 5.6 (GAD Parroquial Fátima, 2015). De la misma forma, aproximadamente 6844.03 hectáreas tienen una baja fertilidad, debido a la baja concentración de materia orgánica y humus (GAD Parroquial Fátima, 2015). La deforestación es un factor influyente para el deterioro de los suelos y la pérdida de fertilidad, siendo un problema latente en la parroquia, y que afecta de forma negativa a la producción agropecuaria (GAD Parroquial Fátima, 2015).

2.2. Evaluación del índice de calidad del suelo (ICS)

Para obtener el ICS, se empleó la metodología detallada por Bravo-Medina *et al.* (2021), la cual se define de tres pasos consecutivos: 1) selección de un mínimo conjunto de indicadores de calidad del suelo, 2) realizar un puntaje de los indicadores y 3) calcular los índices de calidad. Para elegir los indicadores más representativos de la matriz de datos se realizó un análisis de componentes principales (PCA) y se determinó un coeficiente de correlación de Pearson. Únicamente los componentes principales con eigenvalores mayores a 1, es decir al menos los que representen 5% del total de varianza son elegidos como indicadores vitales. De este modo, en cada componente principal, solo los factores con valores de carga absoluta dentro del 10% de la carga del factor más alto son seleccionados. Cuando más de un indicador es seleccionado en un componente principal, se emplea un análisis de correlación de Pearson para verificar si otros indicadores deben ser eliminados. Si los indicadores están adecuadamente correlacionados, es decir un coeficiente de Pearson mayor a 0.6 entre sí, solo se selecciona el indicador con mayor peso en los componentes principales. Después de seleccionar los indicadores de la matriz de datos, se usa una función de puntuación no lineal sigmoide para transformar los indicadores del suelo en puntajes de 0 a 1, como se indica a continuación.

$$S = \frac{a}{\left[1 + \frac{x}{x_0}\right]^b}$$

Donde *S* es el puntaje del indicador del suelo, *a* es el máximo puntaje (a = 1), *x* es el valor

del indicador, x_0 es el valor promedio de cada indicador del suelo, y b es el valor de la pendiente de la ecuación. Los valores de pendiente están en un rango de -2.5 a 2.5. Finalmente, con el puntaje de los indicadores y sus valores de ponderación, el índice del suelo se elige con la siguiente ecuación:

$$SQI = \sum_{i=1}^{n} S_i \times W_i$$

Donde W_i son los valores de ponderación de los indicadores de suelo seleccionados por el PCA, S_i es el puntaje del indicador calculado con la ecuación anterior y n es el número de indicadores seleccionado en la matriz de datos.

2.3. Análisis estadísticos

Se usó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) seguido de una prueba de comparación de media de Tukey ($p \leq 0.05$) para examinar y comparar el efecto de tipo de uso de la tierra sobre los indicadores de suelo y el índice de calidad del suelo (ICS). El análisis de componentes principales y matriz de correlación entre los indicadores de suelo fueron evaluados mediante el análisis de correlación de Pearson y Análisis de Componentes Principales. Todos los análisis estadísticos fueron realizados por SPSS 21.0 (IBM, 2023).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Indicadores de la calidad física bajo diferentes usos del suelo

El análisis de la textura del suelo de 0 a 30 cm de profundidad se muestra en la Tabla 2. Se puede apreciar que solo se registraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para el contenido de arena y limo con clases texturales predominantemente Franco. Los resultados indican que el mayor porcentaje de arena ocurre en el uso con bosque y SSPM, mientras que el menor porcentaje en el SASP.

Tabla 2. Resultado del análisis textural del suelo (arena + limo + arcilla) para diferentes usos del suelo a una profundidad de 0-30 cm. Letras diferentes en negritas en una misma columna indican diferencias significativas a un nivel de P < 0.05. CA: Caña de azúcar; SASP: Sistema Agrosilvopastoril; SSPM: Sistema Silvopastoril Maderable y BS: Bosque Secundario.

Usos de la Tierra	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
		Profundidad 0 – 30 cm		
CA	49.83 ± 5.40 **b**	36.83 ± 1.84 **b**	13.33 ± 3.65 **a**	Franco
SASP	34.33 ± 5.36 **b**	50.08 ± 3.27 **a**	15.58 ± 3.08 **a**	Franco Limosa
SSPM	43.17 ± 4.05 **a**	46.17 ± 2.27 **a**	10.67 ± 2.00 **a**	Franco
Bosque	51.44 ± 6.26 **a**	38.22 ± 2.20 **b**	10.33 ± 4.11 **a**	Franco

Fuente: de los autores.

El mayor porcentaje de limo se presenta en el SASP, y el menor porcentaje en el cultivo de caña. En general, el contenido de arcilla no sobrepasa el 15% en todos los tratamientos del suelo.

La calidad estructural del suelo fue analizada de acuerdo con diferentes propiedades físicas bajo diferentes usos de la tierra, cuyos valores promedios se indican en la Tabla 3. Se puede apreciar que para ninguna de las variables evaluadas se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$). La densidad aparente varía en un limitado rango de 0.48 – 0.53 Mg/m^3 en todos los usos, reflejando unos valores adecuados en comparación con el valor de referencia (1.2 Mg/m^3) para este tipo de textura franco (Pla, 2017). El valor de la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) más elevada se encontró en el uso de bosque y el SSPM, mientras que en el SASP es menor, lo cual se relaciona con los valores de la distribución de tamaño de poros, especialmente la porosidad de aireación (PA). Igualmente, el comportamiento de esta variable también se relaciona con la condición textural y estructural que favorece la penetración y movimiento del agua en el perfil de suelo, especialmente en los primeros 10 centímetros donde existe un mayor contenido de materia orgánica (Bravo-Medina *et al.*, 2021). En todos los usos de suelo evaluado los valores obtenidos son considerados adecuados, por encima del límite crítico de 0,5 cm/h (Pla, 2010).

La porosidad total (PT) del suelo presentó niveles altos independientemente del tipo de uso del suelo con rangos que oscilaron entre 88.10 – 92.03 %, por encima del umbral considerado como critico (60%). Los valores de la porosidad total obtenidos estuvieron muy relacionados con la densidad aparente (DA), sugiriendo que una mayor densidad significó menor porosidad total (PT) y viceversa. Independientemente de la cobertura de suelo en la fracción total de poros (PT) predominan los microporos o poros de retención (PR) por encima de los macroporos (PA >15 μm) (Tabla 3), lo cual le confiere una alta capacidad de retención de humedad, relacionado con la clase textural predominantemente arcillosa. Los valores son las medias ± desviación estándar. Sin embargo, cuando se analiza la fracción de los macroporos se registró rangos que oscilaron entre 10.95 – y 13.51 mostrando un patrón inverso a la densidad aparente y por encima del valor umbral de 10 % (Pla, 2010). Un valor de 10% en el PA permite una buena trasmisión de agua, aire, calor y facilita el crecimiento de las raíces mejorando la calidad y potencial productivo del suelo (Bravo, Ramírez, *et al.*, 2017; Taboada y Álvarez, 2008).

Tabla 3. Valores promedio de los indicadores de la calidad del suelo bajo diferentes usos del suelo en la Finca Agro productiva El Naranjal. Letras diferentes en una

misma columna indican diferencias significativas a un nivel de $p \leq 0.05$. CA: Caña de azúcar; SASP: Sistema Agrosilvopastoril; SSPM: Sistema Silvopastoril Maderable y BS: Bosque Secundario.

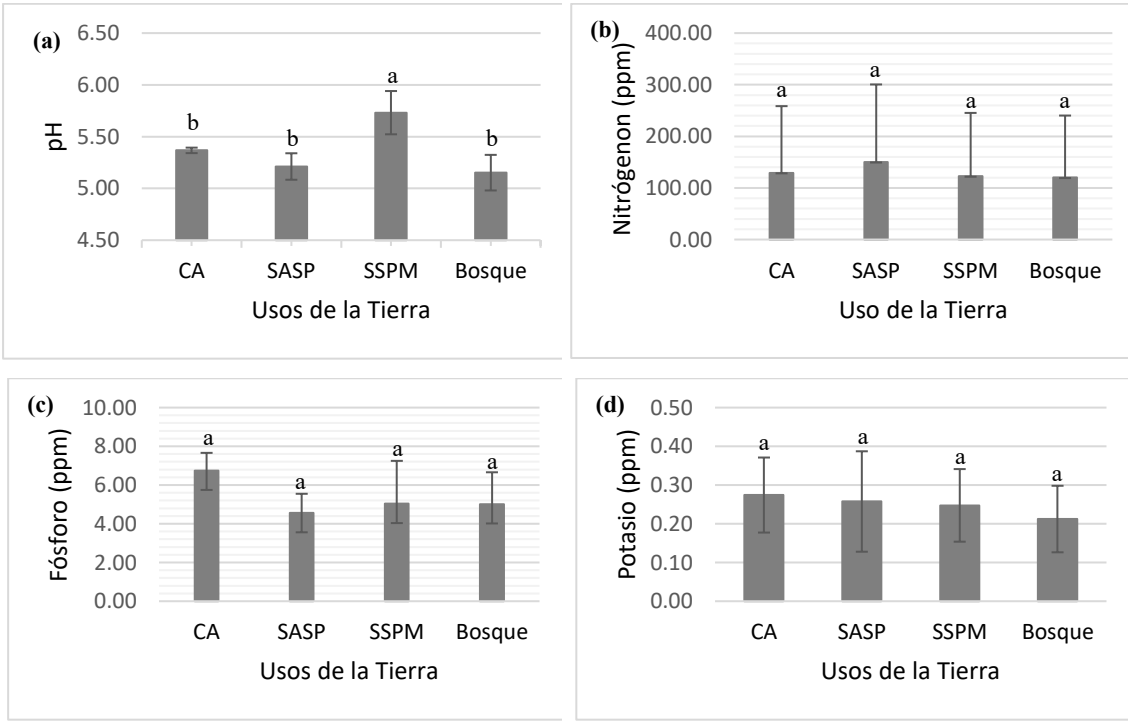
Usos de la Tierra	Densidad aparente (DA) (Mg/m^3)	Conductividad hidráulica saturada (Ksat) (cm/h)	Porosidad Total (PT) (%)	Porosidad de aireación (PA) (%)	Porosidad de retención (PR) (%)
CA	0.53 ± 0.04 **a**	40.81 ± 33.22 **a**	92.03 ± 1.98 **a**	11.64 ± 1.30 **a**	80.39 ± 2.69 **a**
SASP	0.52 ± 0.07 **a**	14.11 ± 6.85 **a**	91.19 ± 2.49 **a**	12.14 ± 2.04 **a**	79.04 ± 2.25 **a**
SSPM	0.48 ± 0.02 **a**	60.04 ± 55.00 **a**	91.00 ± 4.02 **a**	10.95 ± 1.43 **a**	80.04 ± 5.20 **a**
Bosque	0.51 ± 0.21 **a**	100.65 ± 65.56 **a**	88.10 ± 7.75 **a**	13.51 ± 2.44 **a**	74.60 ± 5.39 **a**

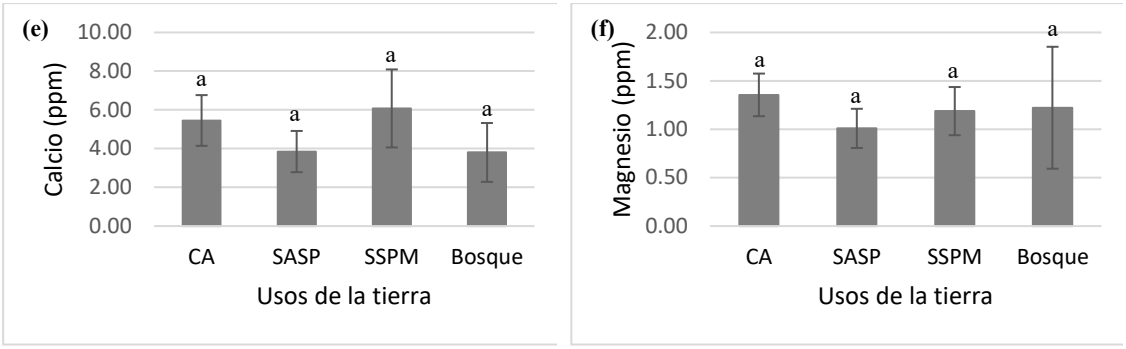
Fuente: de los autores.

3.2 Indicadores de la calidad química bajo diferentes usos del suelo

La figura 2 muestra las propiedades químicas relacionadas con la calidad del suelo para los cuatros distintos usos de la tierra. La acidez exhibió diferencias ($p \leq 0.05$) en el uso de SSPM (Figura 2a). Sin embargo, el contenido de N, P, K, Ca y Mg no mostraron diferencias significativas.

Figura 2. Indicadores químicos asociados con la calidad del suelo bajo distintos usos de la tierra. Barras de error corresponden a la desviación estándar. Letras diferentes sobre las barras de error indican diferencias significativas a un nivel de $p \leq 0.05$. CA: Caña de azúcar; SASP: Sistema Agrosilvopastoril; SSPM: Sistema Silvopastoril Maderable y B: Bosque. Las barras de error corresponden a la desviación estándar. (a) pH; (b) Nitrógeno; (c) Fósforo; (d) Potasio; (e) Calcio; (f) Magnesio.





Fuente: de los autores.

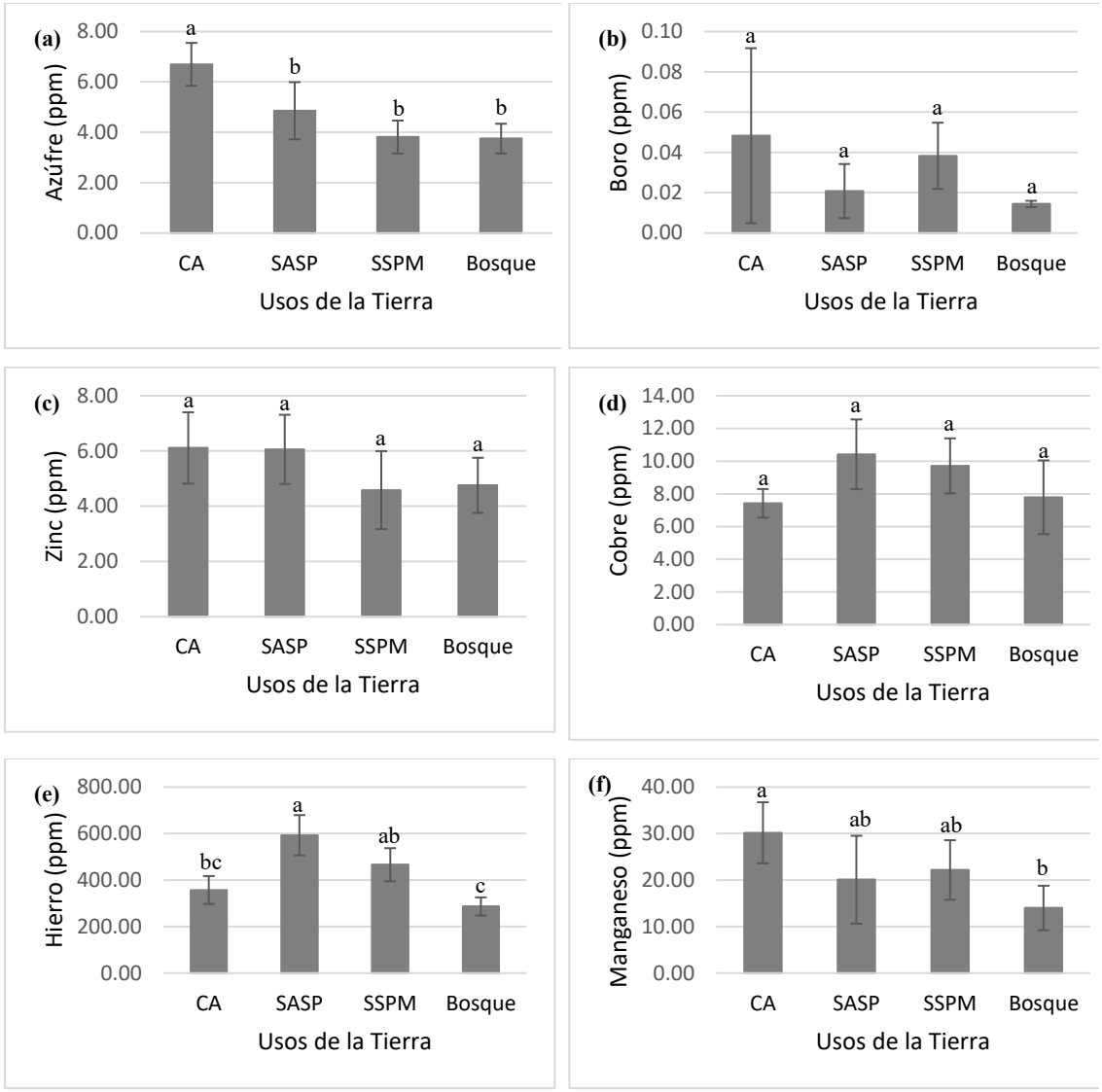
Los distintos usos de la tierra exhibieron un pH superior a 5 y se consideran ácidos con rangos entre 5.25 y 5.75, siendo el uso SSPM el nivel más alto de pH y el uso de Bosque con el valor más bajo (Figura 2a).

La disponibilidad de nutrientes no exhibió diferencias significativas. El contenido de N varió de 120 a 150 ppm (Figura 2b), siendo el uso SASP con mayor contenido y el uso de bosque con menor contenido. Yáñez Díaz *et al.* (2018) mencionan que una de las propiedades químicas que confiere la capacidad productiva a los suelos, son las reservas de nitrógeno, y que este elemento tiende a perderse debido a las intervenciones humanas sobre el suelo. Astorga y Casasola (2018) mencionan que el N interviene en el desarrollo de las hojas, forma parte de las proteínas y es parte de la fotosíntesis. Además, los autores mencionan que su deficiencia ocasiona que las hojas se tornen de color amarillento y se produzca defoliación de las plantas. Bravo *et al.* (2017) señala que la diversidad de especies vegetales con producción de hojarasca de calidad y raíces contribuyen al desarrollo de los ciclos biogeoquímicos, de esta manera se fijan varios nutrientes como el N. El contenido de P varió de 4.56 a 6.75 ppm (Figura 2c), siendo el uso CA que presentó el mayor contenido y el uso SASP con menor porcentaje. Martín y Pérez (2009) indican que los suelos de la provincia de Pastaza son infértiles debido a su alta acidez y toxicidad a causa de exceso de Al y deficiencia de P. En suelos con pH inferior a 5.5 se reduce la disponibilidad de fósforo, debido a que reacciona con el Fe y Al disolviéndose en estas reacciones (Sela, 2023). La deficiencia de P en los suelos tropicales es un obstáculo para la producción de alimentos (Bravo, Ramírez, *et al.*, 2017), debido a que su carencia produce hojas envejecidas, manchas amarillentas que se tornan rojo violeta. El fósforo proporcionan energía para el desarrollo vegetal (Astorga y Casasola, 2018). El contenido de K varió de 0.21 a 0.27 ppm (Figura 2d), siendo el SSPM el que presentó el mayor contenido y el bosque con menor contenido. En general, el contenido de potasio en suelos amazónicos es bajo (Martín y Pérez, 2009) y su deficiencia se asocia a la aparición de

zonas necróticas en las hojas (Astorga y Casasola, 2018). Por otra parte, el contenido de calcio vario de 3.80 a 6.08 ppm (Figura 2e). El contenido de Magnesio y Calcio aumenta en suelos cubiertos por cultivos y disminuyen su contenido en suelos con pasto (Martín y Pérez, 2009). El autor menciona que los suelos Inceptisoles de la región amazónica tienen una deficiencia de fósforo, calcio y potasio (Martín y Pérez, 2009). Sela (2023) menciona que en suelos con pH inferior a 5.2, el calcio puede dejar de estar disponible para las plantas. El calcio favorece el desarrollo de las raíces y la carencia del elemento produce un color blanco en las hojas jóvenes (Astorga y Casasola, 2018). Por último, el contenido de magnesio varió de 1.01 a 1.36 ppm (Figura 2f), siendo el uso de caña con mayor porcentaje y el uso SASP con menor porcentaje. De esta forma suelos con pH inferior a 5.2 tendrán menor disponibilidad de magnesio para las plantas (Sela, 2023).

La disponibilidad de algunos nutrientes varió significativamente ($p \leq 0.05$) en función del uso de la tierra (Figura 3). El azufre disponible varió significativamente en el uso de caña (6.70 ppm), mientras que los otros usos mostraron un rango de S entre 3.75 - 4.86 ppm. Los nutrientes B, Zn y Cu no presentaron diferencias significativas en ningún uso. El contenido de boro varió en un rango de 0.1 – 0.5 ppm, siendo el uso de caña con el mayor contenido y el uso de bosque con el más bajo contenido. Zn varió en un rango de 4.58-6.11 ppm, siendo el uso de caña con mayor contenido y el sistema SSPM con menor contenido. La disponibilidad de cobre varió en un rango de 7.42-10.42 ppm, siendo el uso SASP con mayor disponibilidad y el uso caña con menor contenido. El contenido de hierro en el suelo mostró diferencias significativamente en todos los usos de la tierra. El uso SASP presentó el mayor contenido de hierro (593 ppm), mientras que el uso bosque el menor contenido (286.56 ppm). De igual manera, la disponibilidad de Manganeso varió significativamente ($p \leq 0.05$) en los usos CA, SASP y Bosque, siendo el uso de CA con mayor contenido de manganeso (30.17 ppm), mientras que el uso de bosque presentó el menor contenido (14.00 ppm).

Figura 3. Indicadores químicos asociados con el índice de calidad del suelo bajo distintos usos de la tierra. las barras de error corresponden a la desviación estándar. Letras diferentes sobre las barras de error indican diferencias significativas a un nivel de $p \leq 0.05$. CA: Caña de azúcar; SASP: Sistema Agrosilvopastoril; SSPM: Sistema Silvopastoril Maderable y BS: Bosque Secundario Elementos químicos asociados con la calidad del suelo bajo diferentes usos de la tierra. Las barras de error corresponden a la desviación estándar. (a) Azufre; (b) Boro; (c) Zinc; (d) Cobre; (e) Hierro; (f) Manganeso.



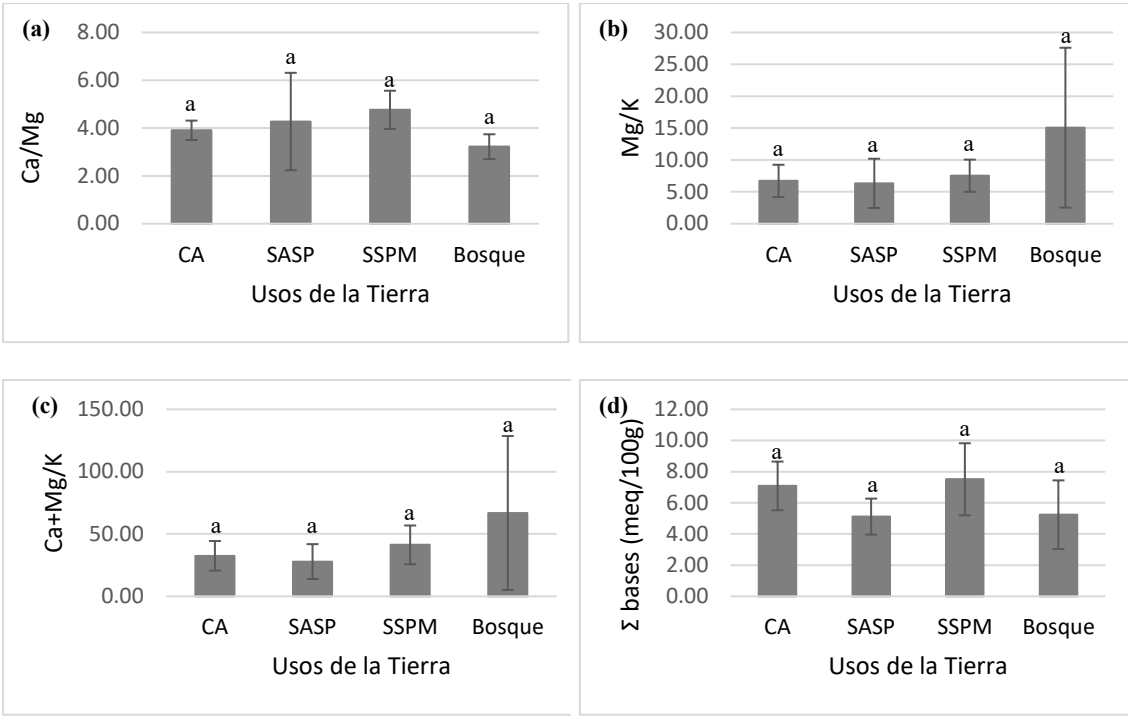
Fuente: de los autores.

La disponibilidad de S en todos los usos está muy por debajo de límite permitido (250 ppm; Ministerio del Ambiente, 2017). S promueve la formación de aminoácidos y la transformación energética en las plantas, su deficiencia ocasiona hojas amarillentas y defoliación (Astorga y Casasola, 2018). En la investigación de Bravo *et al.* (2017) se reporta un contenido de 7.99 ppm para un sistema agroforestal de cacao a una profundidad de 10-30 cm, en esta investigación el valor más alto de S lo presentó el sistema agroforestal de caña (6.70 ppm). El límite máximo permisible de Boro soluble en los suelos de acuerdo a la normativa ecuatoriana es de 1 ppm (Ministerio del Ambiente, 2017), la máxima cantidad encontrada en este estudio fue de 0.05 ppm en el uso CA, mientras que Bravo *et al.* (2017) reporta un valor para B de 0.54 ppm en un monocultivo de cacao a 10-30 cm de profundidad. La carencia de B se asocia con la aparición de hojas amarillentas, pequeñas y bordes redondeados, además de la muerte de temas apicales

(Astorga y Casasola, 2018). El contenido de Zn está por debajo del límite máximo permisible (60 ppm). Bravo *et al.* (2017) reporta un valor máximo de 2.36 ppm en suelos de bosque secundario, mientras que en esta investigación el valor de B para el uso de bosque primario fue de 4.76 ppm, denotando un elevado contenido de zinc en estos suelos con respecto a otras investigaciones. El Zinc promueve la formación de ácido indol acético, el cual estimula el crecimiento de los meristemas, y su deficiencia produce hojas jóvenes con clorosis intervenal y quebradizas (Astorga y Casasola, 2018). En cuanto a la disponibilidad de cobre, en todos los usos está una decena de puntos por debajo del límite máximo permisible (30 ppm) (Ministerio del Ambiente, 2017). En este sentido, los suelos locales se han desarrollado a partir de la meteorización de rocas con minerales que contienen abundante hierro y cobre, por tanto son muy pobres en bases intercambiables, ricos en estos elementos y por lo general con un pH ácido (Bravo *et al.*, 2015). La deficiencia de cobre produce marchitamiento prematuro de las hojas y una coloración amarillenta en ellas (Astorga y Casasola, 2018). Fe presentó diferencias significativas en todos los usos, siendo el uso SASP el mayor valor (593 ppm). Bravo *et al.* (2015) reporta un valor de 421.15 ppm para el contenido de hierro en un uso de pasto anual con árboles. Por el contrario, el uso de bosque presenta un valor mínimo de 286.56 ppm de hierro, mientras que Bravo *et al.* (2015) reporta un valor de 263.68 ppm para el uso de bosque secundario, denotando que el uso de suelo en bosques contiene bajas concentraciones en hierro. Se considera elementos tóxicos al manganeso y aluminio (Bravo *et al.*, 2015).

En cuanto a las proporciones catiónicas (Figura 4), ninguna presentó diferencias significativas. La proporción Ca:Mg (Figura 4a) exhibió un mayor valor en el uso SSPM (4.76), mientras que el menor valor fue en el uso de bosque (3.22). La relación Mg:K (Figura 4b) fue más alta en el sistema de Bosque (15.06), mientras que el menor valor fue en el uso SASP (6.33). La proporción (Ca+Mg/K) (Figura 4c) fue mayor en el uso de bosque (66.87), mientras que fue menor en el uso SASP (27.85). La suma de bases (Figura 4d) fue más elevada en SSPM (7.51 meq/100g), y menor cantidad en SASP. En la figura 4, las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Figura 4. Indicadores químicos asociados con el índice de calidad del suelo bajo distintos usos de la tierra. Letras diferentes sobre las barras de error indican diferencias significativas a un nivel de $p \leq 0.05$. CA: Caña de azúcar; SASP: Sistema Agrosilvopastoril; SSPM: Sistema Silvopastoril Maderable y BS: Bosque Secundario Elementos químicos asociados con la calidad del suelo bajo diferentes usos de la tierra. Las barras de error corresponden a la desviación estándar. (a) Ca/Mg; (b) Mg/K; (c) Ca+Mg/K; (d) Suma de bases.



Fuente: de los autores.

De acuerdo al diagrama de Mulder, la relación Ca:Mg es del tipo antagonista. En este sentido, Ca:Mg debe mantenerse en una proporción 2:1, debido a que el calcio mejora la aireación del suelo, y el Mg favorece la adhesión entre partículas (del Rey, 2019). La proporción Mg:K, el uso de bosque presentó un valor de 3.22 lo cual indica una proporción ideal, mientras que los otros usos presentaron valores entre 3.91 a 4.6 lo que indica una proporción aceptable (del Rey, 2019). El potasio tiene su génesis en la meteorización de rocas que contienen feldespatos y micas, por lo tanto suelos arenosos son pobres en K, mientras que suelos arcillosos son ricos en este elemento (Gallardo, 1982). En cuanto a la relación Ca+Mg/K (del Rey, 2019; Moro González, 2015) mencionan que la relación (< 40) es adecuado para el potasio , mientras que la relación (> 40) indica una deficiencia de potasio. De este modo, los usos de Bosque y SSPM presentaron valores mayores a 40, lo que indica una deficiencia de potasio, lo que es característico de los suelos amazónicos. En cuanto a la suma de bases, también conocida como saturación por bases es la suma de los principales cationes como Ca, Mg, Na y K (Moro González, 2015). Al respecto, Bravo *et al.* (2017) reporta un valor de 6.30 meq/100 ml para el uso de bosque a una profundidad de 10-30 cm, mientras que en este estudio se reporta un valor de 5.24 meq/100 ml. Mientras que para el uso de Pasto anual con árboles señala un valor de 2.92 meq/100 ml, en este estudio se reporta un valor de 7.51 meq/100 ml.

Estos resultados explican la baja fertilidad de los suelos, debido a que son pobres en bases intercambiables y muy ricos en hierro y cobre, además de los bajos valores de saturación de bases y el pH ácido (Bravo, Ramírez, *et al.*, 2017). De igual manera, las altas precipitaciones de la región amazónica lavan las bases intercambiables como el calcio y magnesio (Bravo *et al.*, 2015).

3.3 Evaluación del índice de calidad del suelo

Los autovalores de los componentes principales fueron mayores a 1 y explicaron el 86.04 % de la varianza total (Tabla 4). En el primer componente (CP1), los indicadores de calidad con mayor peso fueron la densidad aparente (Da) y la relación Calcio, Magnesio y Potasio (Ca+Mg/K). Estos dos indicadores mostraron una fuerte correlación ($r > 0.80$) (Figura 5), debido a la mayor carga y facilidad de medición se eligió Da como indicador en el CP1. En la segunda componente principal (CP2), los indicadores con mayor carga fue el pH, la disponibilidad de Calcio (Ca^{2+}), la suma de bases (SB) y Materia Orgánica (MOS); MOS, SB y Ca^{2+} mostraron fuertes correlaciones ($r > 0.85$) (Figura 5), por lo tanto, se seleccionó MOS como indicador en el CP2. En la tercera componente (CP3) los indicadores que mostraron una mayor carga y alto grado de asociación significativa fueron el porcentaje de arena y la disponibilidad de hierro Fe^{2+}, mostrando una correlación ($r > - 0.80$) (Figura 5). Por lo tanto, se eligió % Arena como indicador en CP3. Por último, en la cuarta componente (CP4) se seleccionó la disponibilidad de zinc como indicador de CP4, por exhibir una fuerte correlación con el potasio ($r > 0.70$) y el azufre, mientras que el fósforo muestra débiles correlaciones con otros indicadores. Con esto, el conjunto mínimo de datos seleccionados para el cálculo del índice de calidad del suelo (ICS) fueron Da, MOS, % Arena y Zn. A partir de los pesos o cargas con base en el análisis de componentes principales (Tabla 5), se calculó ICS mediante la siguiente ecuación.

$$\mathbf{ICS} = 0.4153 \times S(Da) + 0.4153 \times S(Ca+Mg/K) + 0.3462 \times S(MOS) + 0.1326 \times S(\%Arena) + 0.1151 \times S(P) + 0.1151 \times S(Zn)$$

Tabla 4. Análisis de Componentes Principales de los indicadores de calidad de suelo. Da: Densidad aparente (Mg/m^3), K_{sat}: conductividad hidráulica saturada (cm /h), PT: porosidad total (%), Pa: Porosidad de aireación (%), Pr: Porosidad de retención (%), P: Fósforo disponible (mg/kg), K^+: potasio intercambiable (meq 100 g/s), Ca^{2+}: calcio intercambiable (meq 100 g/s), Mg^{2+}: magnesio intercambiable (meq 100 g/s), S azufre disponible (mg/kg), Ca:Mg proporción calcio magnesio, B: boro disponible (mg/kg), Zn: zinc disponible (mg/kg), Cu: cobre disponible (mg/kg), Mn: Manganeso disponible (mg/kg), MOS: materia orgánica del suelo (%). Los valores subrayados

y en negrita son considerados de alto peso, y por lo tanto retenidos en el conjunto mínimo de datos (MDS). CP1, CP2, CP3 y CP4 indican los componentes principales.

Variables	CP1	CP2	CP3	CP4	Comunalidades
% Arena	0.06	0.05	**-0.98**	0.06	0.98
% Limo	0.09	0.04	0.91	-0.31	0.96
% Arcilla	-0.38	0.01	0.76	0.31	0.93
Da Mg m-3	**-0.80**	-0.08	0.35	0.20	0.97
Ksat cm h-1	0.08	0.13	-0.69	-0.39	0.79
PT %	0.73	0.40	0.00	0.30	0.89
Pa %	0.51	-0.31	-0.41	-0.21	0.87
Pr %	0.52	0.54	0.17	0.39	0.90
pH	-0.03	**0.83**	0.12	-0.42	0.98
NH4+	0.33	-0.11	0.02	0.26	0.98
P mg kg-1	0.00	0.36	-0.17	**0.76**	0.92
K meq 100 g s-1	0.75	0.34	-0.17	0.32	0.80
Ca meq 100 g s-1	0.11	0.94	0.00	0.14	0.96
Mg meq 100 g s-1	0.12	0.76	-0.15	0.32	0.97
S mg kg-1	0.11	0.22	0.05	0.59	0.95
Ca:Mg	0.09	0.36	0.20	-0.08	0.93
Mg: K	-0.90	-0.13	-0.02	-0.15	0.95
(Ca+Mg)/K	**-0.93**	0.01	0.04	-0.18	0.96
Suma de Bases	0.16	0.94	-0.03	0.18	0.95
B mg kg-1	0.13	0.19	-0.16	0.00	0.97
Zn mg kg-1	0.44	0.14	0.13	**0.73**	0.65
Cu mg kg-1	0.80	0.11	0.29	-0.17	0.87
Fe mg kg-1	0.24	0.06	**0.85**	-0.06	0.83
Mn mg kg-1	-0.10	0.46	0.08	0.05	0.95
MOS %	0.16	**0.94**	-0.03	0.18	0.89
Hojarasca Mg ha-1	0.49	-0.12	0.02	0.06	0.97
Autovalores	2.77	7.08	1.18	2.89	
Varianza (%)	38.54	28.33	12.16	7.01	
Varianza acumulada (%)	38.54	66.87	79.03	86.04	

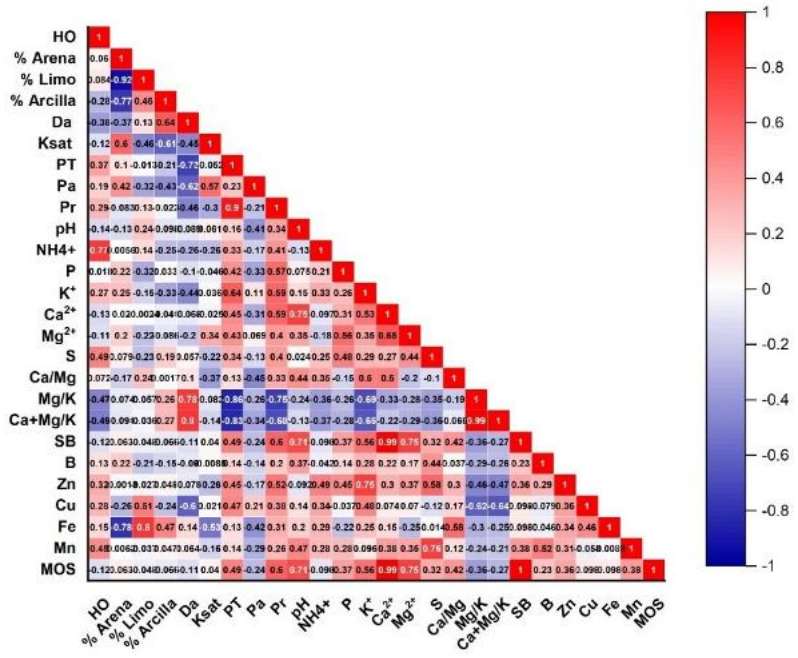
Fuente: los autores.

Tabla 5. Ecuación de normalización de curvas de puntuación

Parámetro	Da	Ca+Mg/K	MOS	% Arena	P	ZN
Promedio	0.51	10.17	6.24	44.69	5.34	5.38
Tipo de curva	Menos es mejor	Más es mejor	Más es mejor	Más es mejor	Más es mejor	Más es mejor
Pendiente (b)	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
Ecuación de normalización	$S = a/[1+(x/0.51)]^b$	$S = a/[1+(x/10.17)]^b$	$S = a/[1+(x/6.24)]^b$	$S = a/[1+(x/44.69)]^b$	$S = a/[1+(x/5.34)]^b$	$S = a/[1+(x/5.34)]^b$
Valor de ponderación	0.41	0.35	0.13	0.13	0.10	0.10

Fuente: los autores.

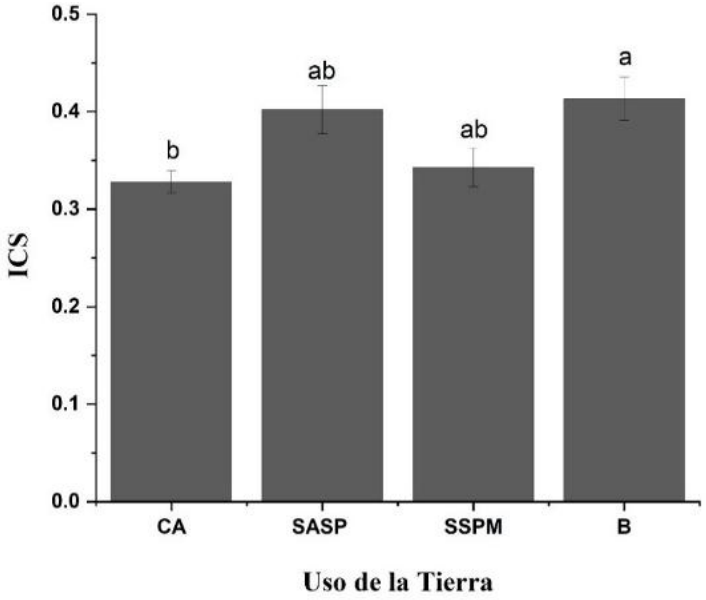
Figura 5. Matriz de correlación entre los diferentes indicadores de la calidad del suelo.



Fuente: de los autores.

El Índice de calidad de suelos (ICS) mostro diferencias significativas ($p<0.05$; Figura 6) entre los distintos usos de la tierra, estableciendo el siguiente orden: B (0.41)>SASP (0.40)>SSPM (0.34)>CA (0.33). Valores de ICS entre 0.40 a 0.60 son categorizados como de moderada calidad, mientras que promedios entre 0.20 a 0.39 son señalados como valores de baja calidad (Cantú *et al.*, 2007). Por tanto, los valores obtenidos son considerados de baja a moderada calidad resultando el bosque y los sistemas agroforestales como los de mayor calidad.

Figura 6. Índice de calidad del suelo bajo diferentes usos de la tierra. Barras del error se corresponde con la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas en medio de diferentes usos de la tierra (P ≤ 0,05).



Fuente: los autores.

Es importante señalar que el uso de sistemas agroforestales con cobertura no solo protege al suelo de la erosión (Bravo, Torres, *et al.*, 2017; Vallejo-Quintero, 2013) sino que la alta cantidad de hojarasca que se genera en la superficie del suelo produce un mejoramiento de las propiedades del suelo principalmente de la materia orgánica y en consecuencia de la estructura del suelo. (Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Bravo, Ramírez, *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2017).

El mínimo grupo de indicadores es un método efectivo para evaluar la calidad del suelo, debido a que se reduce la duplicación de datos, proporciona buena precisión y es rápido (Bravo-Medina *et al.*, 2021; Cantú *et al.*, 2007). En este trabajo fueron seleccionados cinco indicadores (Da, Ca+Mg/K, MOS, % arena, P, Zn) con variado factor de ponderación en la evaluación de mínimo grupo de indicadores. Previos estudios han mostrado que MOS, Da, Zn fueron potenciales indicadores de calidad del suelo (Bravo-Medina *et al.*, 2021; Karlen *et al.*, 2006; Viana *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2007). En este estudio, la Da, MOS y su relación con la distribución de poros como indicadores de la calidad física del suelo (estructura) reflejan su importancia debido a su mayor contribución al índice de calidad integrado, no obstante la menor contribucion del contenido P disponible reflejan la naturaleza química de los suelos en la amazonia ecuatoriana con ambientes distróficos, tal como ha sido señalado en estudios anteriores (Bravo, Torres, *et al.*, 2017; Custode y Sourdat, 1986; Martín y Pérez, 2009).

4. CONCLUSIONES

Se calculó el índice de calidad de suelo para cuatro distintos usos de la tierra: cultivo de caña, Sistema Forestal Agrosilvopastoril y Silvopastoril con maderables y uso de bosque, empleando la metodología del mínimo grupo de indicadores. El uso de suelo bosque y agrosilvopastoril presentaron los mayores índices de calidad, 0.41 y 0.40, respectivamente, indicando una moderada calidad. Los resultados señalan que los sistemas agroforestales disminuyen la erosión del suelo, favorecen la producción de hojarasca que mejora las propiedades del suelo en cuanto al contenido de materia orgánica y su estructura.

En cuanto a la selección de indicadores para evaluar la calidad, MOS, Da y Zn son potenciales indicadores del suelo que han sido empleados en otras investigaciones con resultados favorables. Los indicadores Da y MOS tienen una relación directa con la estructura del suelo reflejando su importancia para evaluar de forma integral la calidad. La disponibilidad de fósforo evidencia la génesis química de suelos amazónicos con ambientes distróficos.

La textura del suelo en todos los usos es del tipo Franco, excepto en el uso silvopastoril la cual es franco-limosa debido a su alto contenido en limo. El valor más alto de conductividad hidráulica fue para el uso de bosque y sistema silvopastoril con maderables, esta variable se asocia con la porosidad de aireación la cual favorece a penetración y movimiento del agua por las capas de suelo. La porosidad tiene una relación inversamente proporcional con la densidad aparente. Además, todos los usos tuvieron más del 10% de porosidad de aireación la cual permite la buena transmisión de agua, aire, calor y facilita el crecimiento de raíces mejorando su potencial productivo.

Los resultados de la calidad química, muestran una baja fertilidad y disponibilidad de nutrientes para el suelo, debido a que son pobres en bases intercambiables y ricos en hierro y cobre. Además, tienen bajos valores de saturación de bases y un pH ácido. Esto se explica por las altas precipitaciones de la región amazónica que lavan la baja concentración de bases intercambiables disponibles.

REFERENCIAS

Astorga, C., y Casasola, F. (2018). Balance de nutrientes en sistemas productivos con café, cacao y pastos: una guía para técnicos. En *Agroforestería Sostenible en la Amazonía Ecuatoriana, N° 2* (p. 17). INIAP.

Barrera León, J., Barrezueta Unda, S., y García Batista, M. (2020). Evaluación de los índices de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones

topográficas. *Revista Metropolitana De Ciencias Aplicadas*, *3*(1), 182–190.

Blanco-Canqui, H., y Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, *326*, 164–200. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011

Bravo-Medina, C., Goyes-Vera, F., Arteaga-Crespo, Y., García-Quintana, Y., y Changoluisa, D. (2021). A soil quality index for seven productive landscapes in the Andean-Amazonian foothills of Ecuador. *Land Degradation and Development*, *32*(6), 2226–2241. https://doi.org/10.1002/ldr.3897

Bravo, C., Benítez, D., Vargas, J. C., Reinaldo, A., Torres, B., y Marín, H. (2015). Caracterización socio-ambiental de unidades de producción agropecuaria en la Región Amazónica Ecuatoriana: Caso Pastaza y Napo. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, *4*(1), 3–31.

Bravo, C., Ramírez, A., Marín, H., Torres, B., Alemán, R., Torres, R., Navarrete, H., y Changoluisa, D. (2017). Factores asociados a la fertilidad del suelo en diferentes usos de la tierra de la Región Amazónica Ecuatoriana. *Revista Electrónica de Veterinaria*, *18*(11), 1–16.

Bravo, C., Torres, B., Alemán, R., Marín, H., Durazno, G., Navarrete, H., Gutiérrez, E. T., y Tapia, A. (2017). Indicadores morfológicos y estructurales de calidad y potencial de erosión del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la Amazonía ecuatoriana. *Anales de Geografia de la Universidad Complutense*, *37*(2), 247–264. https://doi.org/10.5209/AGUC.57725

Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., y Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de inidicadores e índices. *Ciencia del Suelo*, *25*(2), 173–178.

Custode, E., y Sourdat, M. (1986). Paisajes y suelos de la Amazonia Ecuatoriana: Entre la conservación y la explotación. *Cultura*, *1*, 325–338. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672007000200008&lng=es&tlng=es.

Davari, M., Gholami, L., Nabiollahi, K., Homaee, M., y Jafari, H. J. (2020). Deforestation and cultivation of sparse forest impacts on soil quality (case study: West Iran, Baneh). *Soil and Tillage Research*, *198*(February 2019), 104504. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104504

del Rey, I. (2019). *Relación entre nutrientes - Diagrama de Mulder*. https://www.tiloom.com/relacion-entre-nutrientes-diagrama-de-mulder/#:~:text=En la relación Calcio %2F Magnesio,de las partículas del suelo.

Doran, J. W., y Safley, M. (1997). Defining and assessing soil health and sustainable productivity. En C. Pankhurst, B. M. Doube, & V. V. S. R. Gupta (Eds.), *Biological indicators of soil health* (pp. 1–28). CAB International.

FAO. (2015). *Funciones del suelo*. https://www.fao.org/documents/card/es/c/0a7cfcb0-e14e-4b18-a06c-856af6ff046e/

GAD Parroquial Fátima. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Fátima*.

GAD Provincial de Pastaza. (2019). *Plan de desarrollo de la Provincia de Pastaza al año 2025: Actualización 2019*.

Gallardo, J. C. (1982). *Estudio de la relación Mg/K en diferentes suelos del Ecuador*. Universidad del Ecuador.

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), 125–137.

IBM. (2023). *IBM SPSS Software* (21.0). https://www.ibm.com/spss

Karlen, D. L., Hurley, E. G., Andrews, S. S., Cambardella, C. A., Meek, D. W., Duffy,

M. D., y Mallarino, A. P. (2006). Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. *Agronomy Journal*, *98*(3), 484–495. https://doi.org/10.2134/agronj2005.0098

Kusumawati, A., Hanudin, E., Purwanto, B. H., y Nurudin, M. (2023). Assessing Soil Quality Index Under Different Sugarcane Monoculture Periods and Soil Orders. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *54*(2), 225–242. https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2112213

Llorente, A. A. (2017). *Evaluación de parámetros físicos de una restauración edafológica (caso de estudio)*. Universidad Militar Nueva Granada.

Mandal, D., Singh, R., Dhyani, S. K., y Dhyani, B. L. (2010). Landscape and land use effects on soil resources in a Himalayan watershed. *Catena*, *81*(3), 203–208. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.03.004

Martín, N. J., y Pérez, G. (2009). Evaluación Agroproductiva de cuatro sectores de la provincia de Pastaza en la Amazonía Ecuatoriana. *Cultivos Tropicales*, *30*(1), 5–10.

Ministerio del Ambiente. (2017). *Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para suelos contaminados*.

Moro González, A. (2015). *Relaciones catiónicas y su interpretación en los análisis de suelos*. https://aqmlaboratorios.com/relaciones-cationicas-analisis-de-suelos/

Mulyono, A., Suriadikusumah, A., Harriyanto, R., y Djuwansah, M. R. (2019). Soil quality under agroforestry trees pattern in upper Citarum watershed, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, *20*(1), 203–213. https://doi.org/10.12911/22998993/93942

Nieto Cabrera, C., y Caicedo Vargas, C. (2012). INAP – Estación Experimental Central Amazónica. *Publicación Miscelánea*, *405*, 102.

Parra-González, S., y Rodriguez-Valenzuela, J. (2017). Determination of the Soil Quality Index by Principal Component Analysis in Cocoa Agroforestry System in the Orinoco Region, Colombia. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, *10*(3), 1–8. https://doi.org/10.9734/jaeri/2017/31346

Pla, I. (2010). Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes {I} – Propiedades mecánicas. *Suelos Ecuatoriales*, *40*(2), 75–93.

Pla, I. (2017). Análisis Crítico de la Calidad de Suelos y de sus indicadores. *Suelos Ecuatoriales*, *43*(1), 1–8.

Sela, G. (2023). *El pH del suelo*. https://cropaia.com/es/blog/el-ph-del-suelo/#:~:text=En suelos naturales%2C el pH,%2C8 a 6%2C5.

Taboada, M., y Álvarez, C. (2008). *Fertilidad Física de los Suelos* (2da edició). Facultad Agronomía (UBA).

Thomazini, A., Mendonça, E. S., Cardoso, I. M., y Garbin, M. L. (2015). SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. *Geoderma Regional*, *5*, 15–24. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.003

Toledo, D. M., Arzuaga, S. A., Galantini, J. A., y Vazquez, S. (2018). Indicadores e índices biológicos de calidad de suelo en Sistemas Forestales. *Ciencia del Suelo*, *36*(2), 1–12.

Universidad de Jaen. (2023). *Práctica: cálculo del índice de la Calidad del Suelo de Olivar (ICSO)*. http://www4.ujaen.es/~jschica/web-pid/isco/guion.html

Vallejo-Quintero, V. E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, *16*(1), 83–99. https://doi.org/https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06

Vargas-Machuca, R. N. (2001). *Indicadores biológicos para la evaluación de la calidad*

de los suelos. 1–10.

Viana, R. M., Ferraz, J. B. S., Neves, A. F., Vieira, G., y Pereira, B. F. F. (2014). Soil quality indicators for different restoration stages on Amazon rainforest. *Soil and Tillage Research*, *140*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.005

Yáñez Díaz, M. I., Cantú Silva, I., y González Rodríguez, H. (2018). Effect of land use change on chemical properties of a vertisol. *Terra Latinoamericana*, *36*(4), 369–379. https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.349

Yu, P., Liu, S., Zhang, L., Li, Q., y Zhou, D. (2018). Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of the Total Environment*, *616–617*, 564–571. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.301

Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., y Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, *64*(2), 253–260. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024

Zhao, D., Xu, M., Liu, G., Ma, L., Zhang, S., Xiao, T., y Peng, G. (2017). Effect of vegetation type on microstructure of soil aggregates on the Loess Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *242*, 1–8. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.014

ANEXOS

ANEXO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1. ANTECEDENTES

La provincia de Pastaza se ubica en la zona centro-oeste del Ecuador, en la región amazónica. Sus límites políticos al norte son las provincias de Napo y Orellana, al sur con las provincias de Morona Santiago, al este con la República del Perú y al oeste con la provincia de Tungurahua. Se divide en 4 cantones y 21 parroquias rurales en su mayoría, además de contar con una extensión de 29,531 km^2 (GAD Provincial de Pastaza, 2019).

La provincia cuenta con varias fuentes de recursos naturales. Existen variados ecosistemas en función de los pisos altitudinales, y caracterizados por abundantes especies vegetales. De hecho, dentro de la provincia se ubican 5 bosques protectores y forman parte de 2 parques nacionales. Además, dentro de la provincia se encuentran las cuencas de los ríos Pastaza, río Tigre y río Napo (GAD Provincial de Pastaza, 2019) .

El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia (GAD Provincial de Pastaza, 2019), menciona que la deforestación causa una evidente modificación de la estructura de los ecosistemas tropicales. De este modo, los la tala de bosque es motivada por las actividades extractivas como: maderera, minería ilegal, expansión de la frontera agrícola y establecimiento de pastizales. Por tal motivo, el estudio de la calidad del suelo es fundamental para conocer la capacidad del suelo de funcionar en equilibrio con el ecosistema (Bravo-Medina *et al.*, 2021) y también cuantificar el nivel de intervención antrópica del mismo.

De 1990 a 2008, la provincia de Pastaza pasó de tener 2’683,943 hectáreas de bosque a tener 2’612,823 hectáreas, es decir una disminución de 71,120 hectáreas (3951 hectáreas por año). Por el contrario, las áreas destinadas para actividades agropecuarias pasaron de 97,205 hectáreas a 205,470 hectáreas durante este periodo de tiempo, lo que indica una duplicación del área destinada a la agricultura. De acuerdo al censo poblacional del 2010 del área total de la provincia, el 89% del uso del suelo corresponde a bosques, el 6.95% para actividades agropecuarias, el 3.27% de humedales y el 1.16% de vegetación arbustiva y herbácea y un 0.08% para zonas urbanas (GAD Provincial de Pastaza, 2019).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de la calidad del suelo

El suelo es uno de los recursos naturales que mantienen el equilibrio de las capas naturales en la Tierra. En este sentido, la materia orgánica y las propiedades físicas, químicas y biológicas son componentes fundamentales del suelo que mantiene su

fertilidad, productividad y equilibrio, permitiendo el desarrollo de plantas, animales y el ser humano (Vargas-Machuca, 2001).

La calidad del suelo es la habilidad de este medio para funcionar dentro de los límites del ecosistema y uso de la tierra con el fin de mantener la productividad, manteniendo la calidad ambiental y promoviendo la salud de la flora y fauna (Bravo-Medina *et al.*, 2021). Otros autores como Doran y Safley (1997) definen la calidad del suelo como su capacidad para funcionar como un sistema vivo, que implica la promoción de la productividad biológica y calidad ambiental.

2.2. Funciones del suelo

El recurso suelo ofrece diferentes servicios ecosistémicos que permiten la vida sobre el planeta. Entre los principales servicios se encuentra: suministro de alimento, fibras y combustible, retención de carbono, purificación del agua, reducción de contaminantes del suelo, regulación del clima a través de los ciclos biogeoquímicos y de nutrientes, otorga hábitat para organismos, regula las inundaciones, alberga compuestos y recursos genéticos que sirve para elaborar productos medicinales (FAO, 2015).

2.3. Indicadores de la calidad del suelo

De este modo, los índices de calidad del suelo (ICS) son útiles en agronomía, para evaluar la calidad del suelo en áreas con diferentes estados de restauración (Viana *et al.*, 2014) y cuantificar la degradación del mismo (Vargas-Machuca, 2001). Los ICS se determinan a partir de ecuaciones matemáticas que requieren de múltiples propiedades del suelo, los cuales son llamados Indicadores de la calidad del suelo, que son bien normalizadas y ponderadas. Los indicadores deben cumplir varias características a saber:

1. Ser fácilmente medibles (Universidad de Jaen, 2023; Vargas-Machuca, 2001; Viana *et al.*, 2014).
2. Correlacionarse con las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Universidad de Jaen, 2023).
3. Responder a los cambios de uso del suelo y restauración (Universidad de Jaen, 2023; Vargas-Machuca, 2001; Viana *et al.*, 2014).

De este modo los indicadores de calidad del suelo se pueden dividir en tres grupos: indicadores físicos, químicos y biológicos. Los indicadores físicos nos indican la capacidad del suelo para proporcionar un ambiente físico adecuado para el crecimiento de las plantas. Entre estos tenemos, la textura, profundidad, densidad aparente, capacidad de retención de agua e infiltración (García *et al.*, 2012).

Los indicadores químicos indican la capacidad del suelo para retener, transformar

y donar elementos químicos hacia el ecosistema o plantas, de este modo los principales indicadores son: contenido de materia orgánica (nitrógeno y carbono), pH, conductividad eléctrica, cantidad de sodio, potasio y fósforo, metales pesados disueltos y capacidad de intercambio de cationes (García *et al.*, 2012).

Por último, los indicadores biológicos indican la eficiencia con que los microorganismos descomponen los restos vegetales que caen al suelo. Además, incluyen la abundancia de macroinvertebrados que cumplen la función de desintegrar, transportar y mezclar los restos orgánicos al suelo. Los principales indicadores biológicos son: biomasa microbiana, nitrógeno con potencial de mineralizarse, respiración edáfica, contenido de agua, temperatura y número de lombrices por unidad de medida (García *et al.*, 2012).

2.4. Metodología para determinar el índice de calidad del suelo

El índice de calidad de suelo es básicamente un número comprendido entre 0 a 1, o definido entre 0 y 100%, el cual valora la calidad de un suelo para funcionar de forma equilibrada en el ecosistema. Los ICS más sencillos, llamados simples se definen a partir de un indicador, habitualmente el porcentaje de carbono orgánico (%CO), cuyos valores se transforman mediante una función *f* adecuada para obtener un valor entre 0 y 1. Esta función de puntuación o llamada *scoring* en inglés, se trata de una relación lineal, donde a mayor contenido de CO, el suelo tiene mayor calidad. Las funciones *scoring* se obtienen de la experiencia personal del investigador o en literatura (Universidad de Jaen, 2023).

Sin embargo, la calidad del suelo depende de una gran variedad de factores que difícilmente se pueden evaluar en base a un solo indicador. Lo habitual es que los índices se compongan de una suma de múltiples indicadores de calidad, si esto es así, se denominan índices multiparamétricos. De esta forma, el índice multiparamétrico más simple de componen de una suma de *n*-indicadores, previamente transformados mediante funciones de puntuación adecuada.

Un problema frecuente que ocurre al confeccionar ICS multiparamétricos es el problema de la ponderación. Consiste en que saber qué importancia tiene cada parámetro al momento de valorarse. Por ejemplo, con base en la experiencia de un investigador, quizás el porcentaje de carbono orgánico del suelo puede ser más importante que su granulometría o viceversa. La ponderación consiste en asignar un peso relativo, en forma de coeficiente entre 0 y 1, a cada indicador. En el caso que el coeficiente sea igual a cero, el indicador no se considera para calcular ICS. Por lo tanto, antes de establecer ICS se deben resolver las cuestiones relacionadas con las funciones *scoring* y la ponderación

(Universidad de Jaen, 2023).

Para tomar en cuenta los indicadores de calidad del suelo mediante funciones de puntuación y hallar los coeficientes de ponderación a menudo se emplea la técnica de Análisis de Componentes Principales (*PCA en inglés*) Esta técnica permite combinar diversos indicadores originales en indicadores compuestos (componentes principales), los cuales tiene la misma información de origen, pero se reducen el número de indicadores del sistema para hacerlo de forma más manejable. Además, la técnica PCA cuantifica la variabilidad en función del porcentaje de varianza o carga factorial, para seleccionar los indicadores más influyentes en función de la carga factorial. Además, existe una técnica llamada Análisis de componentes principales categóricos que permite convertir a escala numérica aquellos indicadores cualitativos, tales como indicadores morfológicos, a través de un proceso conocido como escalamiento óptimo (Universidad de Jaen, 2023).

La cuantificación de la calidad del suelo es un proceso complejo y no existe aún un consenso plenamente establecido en la sociedad científica. Debido a que las interrelaciones entre indicadores físicos, químicos y biológicos son complejos y el índice de calidad del suelo es muy variable entre distintas regiones, la evaluación de la calidad ha tenido varias propuestas que incluyen indicadores y parámetros edáficos. Sin embargo, varios métodos parecen coincidir que para calcular el índice de calidad se deben seguir tres pasos: 1) seleccionar los indicadores de una matriz de datos, 2) puntuar los indicadores y 3) clasificar los indicadores según su nivel de importancia relativa en función del tipo de suelo y los objetivos definidos para el uso de suelo. El conjunto mínimo de datos de indicadores y su importancia relativa varían en función del tipo de suelo. Para ponderar los indicadores existen varios métodos como PCA, análisis de sensibilidad, procesos analíticos jerárquicos (AHP), hasta los juicios de expertos (Mandal *et al.*, 2010).

Por otra parte, Cantú *et al.* (2007) menciona que para evaluar la calidad de suelos es necesario tener un número mínimo de indicadores, en donde se determina un valor máximo (Imax) y un valor mínimo (Imin). Posteriormente, cada indicador se normaliza empleando una escala de 0-1 que representan, la peor y mejor condición, en cuanto a la calidad, independientes del valor absoluto de cada indicador. En este punto, pueden ocurrir dos situaciones, si el valor máximo del indicador es la mejor situación de calidad, entonces el cálculo del valor normalizado es Vn = (Im-Imin/Imax-Imin). Por el contrario, cuando el valor máximo corresponde a la peor situación, el valor normalizado es Vn = Valor normalizado. Donde Im indicada la medida del indicador. Finalmente, se calcula el

índice de calidad del suelo, realizando un promedio de los valores normalizados de todos los indicadores.

2.5. Estado del arte

2.5.1. Índice de calidad del suelo en sistemas agroforestales

Parra-González y Rodriguez-Valenzuela (2017) realizaron un estudio para obtener el índice de calidad del suelo sobre un sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao L.*) y yopo (*Anadenanthera peregrine Vel*), establecido en el piedemonte llanero de la región del Orinoco en Colombia. Emplearon el análisis de componentes principales (PCA) que permitió reducir un conjunto de 13 características del suelo en uno a cinco componentes principales para calcular el índice de calidad del suelo. El índice de calidad de suelo fue de 0.49, que se califica como calidad media. Por lo tanto, se puede deducir que, en este sistema agroforestal, la producción de hojarasca y la interacción del suelo beneficia el ciclo de nutrientes, debido al alto contenido de fósforo hallado en el suelo estudiado. Con los resultados, es posible aplicar estrategias de gestión que orienten a la adecuada producción de hojarasca, la mejora de la materia orgánica y el manejo de la estructura del suelo. Además, aunque los sistemas agroforestales se han considerado por varios años esquemas de producción que desempeñan un papel importante en la reducción de pérdidas de nutrientes en comparación con la agricultura tradicional, los índices de calidad del suelo sirven para mejorar el modelo productivo de los elementos sensibles del suelo según las condiciones particulares de cada región.

Thomazini *et al.* (2015) evaluaron el efecto sobre la calidad del suelo y el carbono orgánico en tres sistemas representativos de agroforestería: café agroforestal, café a pleno sol y de una selva nativa lluviosa (la cual se eligió como control para la calidad del suelo). Realizaron muestreos en 5 distintas profundidades 0-5, 5-20, 20-40, 40-60 y 60-100 centímetros. De acuerdo a los resultados de la calidad del suelo, determinado mediante análisis de componentes principales, mostró que el sistema de café agroforestal es el más adecuado ya que preserva la calidad del suelo.

Mulyono *et al.* (2019) implementó el método estadístico del análisis de componentes principales (PCA) para evaluar la calidad del suelo en sistemas agroforestales, en la Java Occidental. El conjunto mínimo de datos estaba compuesto por cuatro indicadores químicos del suelo y representaba el 83.6% de la variabilidad de los datos: pH, calcio intercambiable, carbono orgánico y sodio intercambiable. Entre los principales resultados, los autores mencionan que el café basado en un sistema de cultivo intercalado con árboles maderables, árboles de uso múltiple y horticultura proporciona

una mejor calidad del suelo.

2.5.2. Índice de calidad del suelo sobre suelos agrícolas

Yu *et al.* (2018) menciona que los índices de calidad del suelo son una herramienta efectiva para evaluar los impactos de las prácticas de manejo agrícola sobre la calidad del suelo. En este sentido, entender la influencia de la conversión de uso del suelo sobre su calidad, es esencial para adoptar prácticas de manejo agrícola en regiones específicas. El autor determinó los índices de calidad del suelo para diferentes tratamientos de cultivos: maíz, forraje perenne de alfalfa, pastizal de *Lyemus chinensis* y pastizales regenerativos. Los resultados indican que los ICS más altos se presentaron en los tratamientos con pastizal de *Lyemus chinensis,* seguido del tratamiento de pastizal regenerativo y alfalfa, que fueron significativamente mayores que el tratamiento de maíz. De este modo, los autores indican que la conversión de tierras de cultivo a pastizales o praderas mejora significativamente la calidad del suelo, al menos al noreste de China (Yu *et al.*, 2018).

El tipo de cultivo y la topografía pueden influir en los resultados de la evaluación de la calidad del suelo. Barrera León *et al.* (2020) caracterizó varios cultivos: cacao joven, cacao maduro y banano, mediante propiedades físico-químicas del suelo y estimó el ICS bajo diferentes condiciones de topografía, en la provincia de El Oro. Los resultados indican que el mayor índice de calidad del suelo fue para el cultivo de cacao joven (0,47), seguido del cultivo de banano (0,42) y que el cacao maduro presento el índice más bajo (0,39). En este sentido, el contenido de carbono es considerado una variable clave debido a su marcada influencia en los indicadores del suelo.

Kusumawati *et al.* (2023) determinó el índice de calidad del suelo en cultivos intensivos de caña de azúcar en Indonesia, los cuales se establecían sobre Entisoles, Inceptisoles y Vertisoles. Los resultados indican que la calidad aumentó 28,2% en los Inceptisoles, y disminuyó 25,8% en Vertisoles y no hubo una clara relación de la calidad en Entisoles hasta los periodos de monocultivo de 30 años. El índice de calidad tiene un mayor efecto sobre la productividad de la caña de azúcar. Por lo tanto, el impacto a largo plazo de los cultivos de caña de azúcar sobre la calidad del suelo, dependen en gran medida del orden del suelo, por lo que se recomienda gestionar el tipo de tierra en determinados sitios en función del orden del suelo para que el cultivo de caña de azúcar pueda ser sostenible y genere rendimientos deseados.

2.5.3. Índice de calidad del suelo sobre áreas deforestadas

Toledo *et al.* (2018) realizaron una investigación para determinar indicadores biológicos de calidad del suelo, en tierras que inicialmente se deforestaron para fines

forestales, como la implantación de *Pinus* y *Eucaliptus,* en la provincia de Misiones, Argentina. El estudio pone en evidencia la sensibilidad de algunos indicadores e índices ante los cambios de uso del suelo, sobre todo para fines forestales. Para ello se muestrearon 12 lotes en dos tratamientos: de cultivo de Pino y Selva. Además, determinaron materia orgánica total (MO), materia orgánica particulada (MOP), nitrógeno total (N), nitrógeno potencialmente mineralizable (NPM), respiración del suelo (RS). A partir de estos indicadores se aplicaron índices funcionales compuestos como NPM/N, NPM/MOP, MOP/MO y NPM/RS. Los resultados señalan que, tras 20 años del desmonte de la selva para implantar pino, se ha producido una alteración del equilibrio en el suelo, evidenciado por las variaciones en la cantidad de MO disponible para el suelo y los procesos biológicos. Además, los autores muestran que los indicadores MO, MOP, N, NPM y RS resultaron ser buenos para detectar las variaciones del cambio de uso para fines forestales. Por lo tanto, validaron la hipótesis de que los parámetros biológicos son sensibles a detectar cambios de uso del suelo, manifestado por el desmonte de la selva y el posterior uso forestal (Toledo *et al.*, 2018).

Davari *et al.* (2020) determinó el índice de calidad del suelo, en áreas deforestadas para conversión a tierras de cultivo en Irán. El análisis de datos indica que la deforestación y posterior agricultura de secano aumentan significativamente el pH del suelo, la conductividad eléctrica, la densidad aparente y el factor de erosión del suelo. Además, se tiende a reducir el carbono orgánico del suelo, la porosidad total, la conductividad hidráulica saturada y el diámetro medio de agregados finos. Por lo tanto, los autores indican que las prácticas de eliminación de bosques y las prácticas de cultivo, degradan el suelo y tienen un impacto negativo significativo en la calidad del suelo, lo que resulta en una disminución de hasta el 44,5% del ICS (Davari *et al.*, 2020).