

Índice de calidad nutricional en suelos cacaoteros de la subregión cordillera de Nariño

Nutritional quality index in soils cultivated with cocoa in the Colombian Nariño mountain subregion

Diego Leonardo Cortés-Delgadillo¹, José Libardo Lerma-Lasso², Juan Fernando López-Rendón³, Diego Hernán Meneses-Buitrago⁴, Eliana Martínez-Pachón⁵



Siembra 11 (1) (2024): e6027

Recibido: 15/01/2024 Revisado: 27/02/2024 Aceptado: 07/03/2024

¹ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, Centro de Investigación Obonuco. Pasto, Nariño, Colombia.

✉ dlcortes@agrosavia.co

🔗 <https://orcid.org/0000-0002-0972-6719>

² Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, Centro de Investigación Obonuco. Pasto, Nariño, Colombia.

✉ jlerma@agrosavia.co

🔗 <https://orcid.org/0000-0003-4920-9801>

³ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, Centro de Investigación El Nus. San Roque, Antioquia, Colombia.

✉ jflopezr@agrosavia.co

🔗 <https://orcid.org/0000-0002-7035-1880>

⁴ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, Centro de Investigación Obonuco. Pasto, Nariño, Colombia.

✉ dmeneses@agrosavia.co

🔗 <https://orcid.org/0000-0003-3033-3079>

⁵ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, Centro de Investigación Tibaitatá. Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

✉ emartinezp@agrosavia.co

🔗 <https://orcid.org/0000-0002-5144-132X>

*Autor de correspondencia:
dlcortes@agrosavia.co

Resumen

La calidad del suelo sirve para determinar si un sistema productivo es sostenible. El objetivo de este estudio es estimar un índice de calidad de nutrientes del suelo para cacao [ICNs], mediante la estandarización de variables, desarrollo de funciones de puntuación y asignación de pesos relativos. Se estandarizaron los macronutrientes y micronutrientes, acidez (pH), contenido de materia orgánica [%MO] y saturación de aluminio [%S.AI]. Los ICNs se analizaron de acuerdo con las unidades cartográficas del suelo [UCS]. Se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático asistido por computadora para la calibración de un modelo de predicción espacial del ICNs. Se encontró que el 70,6 % de los sitios se clasificaron con ICNs medio (0,4 -0,7), el 23,8 % fueron bajos y el 5,6 % fueron altos. Las UCS con ICNs más altos también tienen mejor retención de agua, una limitada profundidad efectiva y se encuentran en pendientes pronunciadas; aquellas con ICNs más bajos se vieron afectados por deficiencias de MO y contenido de macronutrientes, pero esos sitios se encontraron en zonas más accesibles. Se obtuvo el mapa de distribución espacial del ICNs que ofrece la representación visual detallada de las áreas con mayor y menor aptitud nutricional para el cultivo de cacao. El ICNs permite entender la oferta nutricional del suelo en la subregión cordillera de Nariño, pero integrar factores adicionales, como la profundidad del suelo, el relieve y la disponibilidad de agua, mejoraría el monitoreo y permitiría un manejo más efectivo de los cultivos de cacao en consonancia con los principios de la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: *Theobroma cacao* L., calidad de suelo, manejo del suelo, sostenibilidad de suelo

Abstract

Soil quality is used to determine whether a production system is sustainable. The objective of this study is to estimate a soil nutrient quality index [NQI] for cocoa by standardizing variables, developing scoring functions, and assigning relative weights. Macronutrients and micronutrients, acidity (pH), organic matter content [%OM] and aluminum saturation [%Al.S] were standardized. The NQI were analyzed according to the soil cartographic units [SCU] and sampling site locations. Computer-assisted

SIEMBRA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>

ISSN-e: 2477-8850

Periodicidad: semestral

vol. 11, núm 1, 2024

siembra.fag@uce.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v11i1.6027>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

machine learning algorithms were used for the calibration of a spatial prediction model of the NQIs. It was found that 70.6 % of the sites were classified with a medium (value of) NQI (0.4-0.7), 23.8 % were low, and 5.6 % were high. The SCU with the highest NQI also had the best water retention, limited effective depth and were located on steep slopes; those with the lower NQI were affected by deficiencies in OM and macronutrient content, but those sites were found in more accessible areas. The spatial distribution map of the NQI was obtained, providing a detailed visual representation of the areas with higher and lower nutritional suitability for cocoa cultivation. The NQI allows to understand the nutritional supply of the soil in the Cordillera subregion of Nariño, but integrating additional factors such as soil depth, relief, and water availability would improve the monitoring and enable a more effective management of cocoa crops in line with environmental sustainability principles.

Keywords: *Theobroma cacao* L., soil quality, soil management, soil sustainability

1. Introducción

En Colombia, el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) desempeña un papel clave en la agricultura campesina, familiar y comunitaria [ACFC]. Este cultivo no solo proporciona granos con calidad organoléptica en alta demanda internacional, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental. Su sistema de producción favorece la captura de carbono atmosférico, la baja emisión de gases de efecto invernadero, la protección de la biodiversidad por medio de la reducción de la deforestación y siembra de forestales nativos como sombrío; asimismo a la conservación del suelo y la regulación de ciclos biogeoquímicos de nutrientes y agua, ofreciendo así una oportunidad de desarrollo económico sostenible para las comunidades rurales (Rojas-Molina et al., 2021; Trinidad et al., 2016). Aunque este cultivo ha surgido como una alternativa para la subregión de la cordillera en Nariño, se enfrentan grandes desafíos que dificultan su adopción por parte de los productores. Estos desafíos están vinculados a la presencia de cultivos improductivos a causa de cacaotales envejecidos, la falta de asistencia técnica, la incompatibilidad genética de clones y, además, a problemáticas sociales por amplia presencia de grupos armados que controlan el territorio y cultivos ilícitos que desplazan los cultivos de este grano (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2020).

La implementación adecuada de la ACFC y la adopción de prácticas de conservación en la producción de cacao están estrechamente relacionadas con la calidad del suelo. Esta calidad, originalmente definida como la aptitud del suelo para un uso productivo (Araujo et al., 2018), se reinterpreta como su capacidad para contribuir con diversos servicios ecosistémicos, como: regular la oferta hídrica, atenuar contaminantes ambientales, capturar carbono, mantener la biodiversidad o, como en el contexto de este estudio, producir alimentos sanos y nutritivos (Araujo et al., 2018; Baveye et al., 2016; Bünemann et al., 2018; Castro Méndez et al., 2021; Doran y Parkin, 1994; Kuzyakov et al., 2020; Villareal-Núñez et al., 2013). Evaluar la calidad del suelo es crucial para determinar la sostenibilidad a largo plazo de un sistema productivo (Doran y Parkin, 1994). Esto implica medir características biológicas, físicas y químicas (Seybold et al., 1999), y combinarlas matemáticamente para comprender los efectos del manejo del suelo y establecer indicadores de seguimiento (Castillo-Valdez et al., 2021; Papić, 2016).

Entendiendo que el suelo es un sistema abierto, conformado por una red estructural compleja, discreta y diversa de componentes funcionales bióticos y abióticos (Obando Moncayo, 2016), es fundamental seleccionar adecuadamente las variables de evaluación, ya que la magnitud de la expresión de estas difieren entre localidades y los factores de formación del suelo (Arshad y Coen, 1992; Figueroa Jáuregui et al., 2018; Jaramillo, 2002). La identificación de variables se realiza a través de un proceso descriptivo e interpretativo basado en el paradigma factorial en el que el suelo es una función del clima, organismos, relieve, material parental, tiempo, entre otros (Cortés Lombana, 2014). Las unidades cartográficas [UCS] delimitadas en un mapa de suelos no muestran la variabilidad interna de las variables de suelos. Sin embargo, estas UCS proporcionan un marco de referencia para el análisis espacial de las variables de suelos (Zinck, 2012).

Diferentes autores han investigado la calidad del suelo en diferentes regiones y períodos de tiempo (Andrews et al., 2004; Seybold et al., 1999). Se han desarrollado índices de calidad del suelo [SQI] en países como Panamá, Turquía, México, Brasil y Colombia, utilizando una variedad de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Andrews et al., 2004; Araujo et al., 2018; Castillo-Valdez et al., 2021; Şeker et al., 2017; Villareal-Núñez et al., 2013), aplicando funciones de puntuación sugeridas por estudios previos (Seybold et al., 2018).

Los indicadores químicos más utilizados para generar SQI son: capacidad amortiguadora del suelo, disponibilidad de nutrientes, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico [COS], materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno, capacidad de adsorción de fosfatos y disponibilidad de micronutrientes.

Las propiedades materia orgánica [MO], fósforo [P], potasio [K] y magnesio [Mg] intercambiables definen más cercanamente el estado actual de la fertilidad de los suelos y evidencian su degradación; el COS es muy sensible y presenta una alta asociación con sistemas de labranza. Por lo tanto, a partir de resultados de estos indicadores se pueden definir estrategias macros de manejo de la fertilidad del suelo enmarcados en una zona y un determinado cultivo (Bautista-Cruz *et al.*, 2011).

Predecir el estado actual de los parámetros químicos del suelo, en áreas sin datos disponibles, permite obtener mapas de distribución espacial e identificar áreas con mayor y menor aptitud nutricional para diferentes cultivos (China-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021). El mapeo digital del suelo [MDS] utiliza covariables ambientales asociadas a factores formadores del suelo, como la precipitación, temperatura, radiación solar, relieve, cobertura del suelo, entre otras, para predecir la distribución de propiedades del suelo (Food and Agriculture Organization [FAO], 2022; Varón-Ramírez *et al.*, 2022). Estas covariables están asociadas a los factores de formación de los suelos y pueden provenir de sensores remotos, análisis digital del terreno, clima o mapas temáticos (Grunwald *et al.*, 2011). De este modo, el MDS se ha transformado en una herramienta de gran valor para mejorar la planificación agrícola (Vargas Díaz *et al.*, 2023) y contribuir en el aumento de la productividad y la preservación los recursos naturales.

En este trabajo se adaptó un índice de calidad de nutrientes en el suelo [ICNs] para el cultivo de cacao, en la subregión cordillera del departamento de Nariño, Colombia, a través de la estandarización de variables de suelo y la aplicación de funciones de puntaje. Además, se construyó un mapa digital que muestra la distribución espacial del ICNs. Los resultados obtenidos ofrecen una herramienta valiosa para la planificación local de actividades agrícolas sostenibles, contribuyendo de manera significativa a mejorar la productividad y la conservación de los recursos naturales en la región de estudio.

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción de los sitios de muestreo

Esta investigación fue desarrollada en los municipios de Policarpa, Cumbitara, Los Andes, Leiva y El Rosario, los cuales componen la subregión cordillera del departamento de Nariño en Colombia (Figura 1). Se tomaron muestras compuestas de suelos, en los primeros 30 cm de profundidad, de 143 sitios con cultivos de cacao de más de 12 años. El muestreo se realizó entre octubre de 2020 y noviembre de 2021.

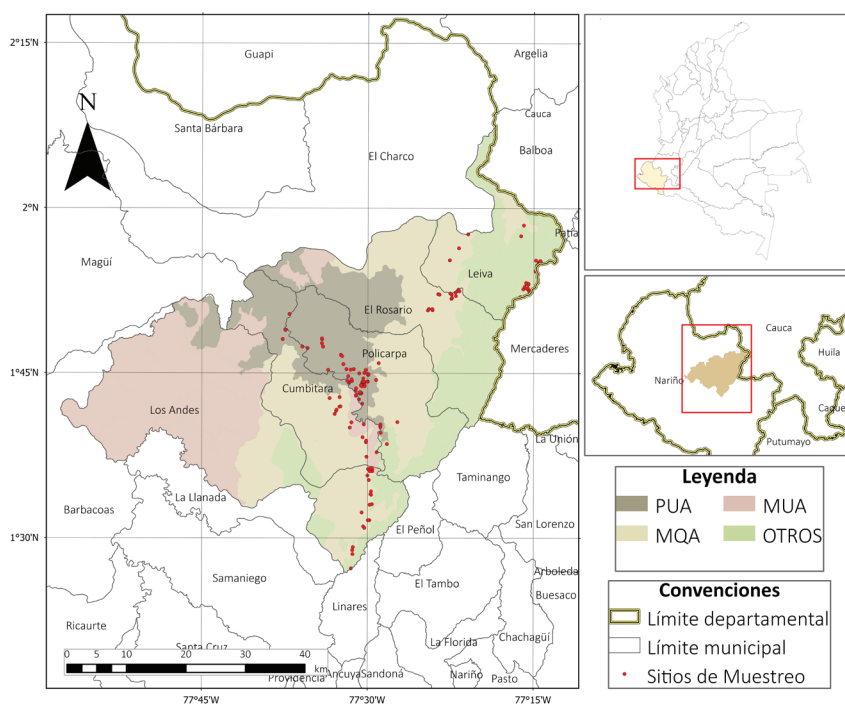


Figura 1. Localización de la zona de estudio, distribución de sitios de muestreo y unidades cartográficas de suelos.

Figure 1. Location of the study area, distribution of sampling sites, and soil cartographic units.

Los sitios de muestreo se localizaron en diferentes UCS, de acuerdo con el estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Nariño, escala 1:100.000 (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2004). Las características de las tres UCS, donde se ubicó la mayor cantidad de sitios (Figura 1, Tabla 1), se describen a continuación:

Tabla 1. Unidades cartográficas de suelos y componentes taxonómicos donde se ubicaron las plantaciones de cacao de la subregión de la cordillera nariñense. Los componentes taxonómicos corresponden a la clasificación USDA (Soil Survey Staff, 2014).

Table 1. Soil cartographic units and taxonomic components where the cocoa plantations of the Cordillera subregion of Nariño were located. Taxonomic components correspond to the USDA classification (Soil Survey Staff, 2014).

UCS	Componente taxonómico principal (perfil modal de suelos)	Sitios muestreados
PUA	Oxic Dystrudepts	56
	Typic Dystrudepts	
MQA	Acrudoxic Hapludands	45
MUA	Typic Dystrudepts	12
	Otras	30
Total		143

Se identificó que 57 sitios se ubicaron en las UCS denominadas MQA y MUA, repartidos en 45 y 12, respectivamente, en el paisaje de montaña, con pendientes fuerte y moderadamente escarpadas con inclinación mayor al 25 %, climas templado húmedo y cálido húmedo (IGAC, 2004). El perfil modal de suelos de la unidad MQA corresponde a Acrudoxic Hapludands (Soil Survey Staff, 2014), es un suelo superficial, de texturas moderadamente gruesas, excesivamente drenado, muy fuertemente ácido, de fertilidad baja, con alta saturación de aluminio y con altos a bajos contenidos de materia orgánica. Por su parte, en la UCS MUA el perfil modal de suelos es Typic Dystrudepts (Soil Survey Staff, 2014), y se caracteriza por ser superficial, de texturas moderadamente finas con gravilla y cascajo, bien drenado, muy fuertemente ácido, de fertilidad natural baja y con materia orgánica media y baja (IGAC, 2004).

Por otra parte, 56 sitios se encontraron en la unidad PUA, en los abanicos del paisaje de piedemonte y clima cálido húmedo (IGAC, 2004); la inclinación de la pendiente oscila entre un 3 % y 25 %, y se presentan zonas bajas o sectores de relieve planocóncavo. Los suelos de esta unidad son Oxic Dystrudepts y Typic Dystrudepts (Soil Survey Staff, 2014) son muy profundos, de texturas finas, bien drenados, fuertemente ácidos, de fertilidad baja y con altos y bajos contenidos de materia orgánica (IGAC, 2004).

2.2. Variables químicas del suelo

Para la configuración del ICNs se definieron cinco variables, o grupos de variables, asociadas a la fertilidad de los suelos y consideradas susceptibles a cambios como consecuencia de la actividad agrícola, parte funcional del suelo es proveer la nutrición mineral a las plantas de acuerdo con lo propuesto por Araujo et al. (2018). Las variables correspondieron a contenido de materia orgánica (%MO), macronutrientes disponibles (P, K, Mg, Ca), micronutrientes disponibles (Zn, Fe, Mn, Cu) potencial de hidrógeno en agua (pH) y saturación de acidez intercambiable (% Sat. Al). La obtención de los análisis se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, acreditado ONAC, bajo la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025:2006.

En la Tabla 2, se detallan los métodos empleados para determinar los parámetros químicos del suelo mencionados en el párrafo anterior.

2.3. Estimación del índice de calidad nutricional [ICNs]

Los valores de cada variable se estandarizaron mediante funciones de puntaje de tipo “más es mejor”, “rangos óptimos” o “menos es mejor” (Andrews et al., 2004), de acuerdo con los requerimientos nutricionales (Tabla 4) del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), y se ajustaron, mediante regresión en Microsoft Excel, a modelos cuadráticos según lo propuesto por Castillo-Valdez et al. (2021) (Figura 2 y Tabla 3).

Tabla 2. Parámetros medidos y métodos utilizados para determinar la concentración de los nutrientes en suelo.
Table 2. Measured parameters and methods used to determine the concentration of nutrients in soil.

Determinación analítica	Unidad	Método
pH (1:2,5)	Unidades de pH	NTC 5264:2008
Materia orgánica (MO)	g 100 g ⁻¹	NTC 5403 Walkey & Black
Fósforo (P) disponible (Bray II)	mg kg ⁻¹	NTC 5350
Azufre (S) disponible	mg kg ⁻¹	Fosfato monobásico de calcio
Boro (B) disponible	mg kg ⁻¹	
Acidez (Al+H)	cmol(+) kg ⁻¹	KCl
Aluminio (Al) intercambiable	cmol(+) kg ⁻¹	
Calcio (Ca) disponible	cmol(+) kg ⁻¹	Bases intercambiables del suelo NTC 5349: 2008
Magnesio (Mg) disponible	cmol(+) kg ⁻¹	
Potasio (K) disponible	cmol(+) kg ⁻¹	
Hierro (Fe) olsen disponible	mg kg ⁻¹	
Cobre (Cu) olsen disponible	mg kg ⁻¹	NTC 5526:2007 Método D
Manganeso (Mn) olsen disponible	mg kg ⁻¹	
Zinc (Zn) olsen disponible	mg kg ⁻¹	

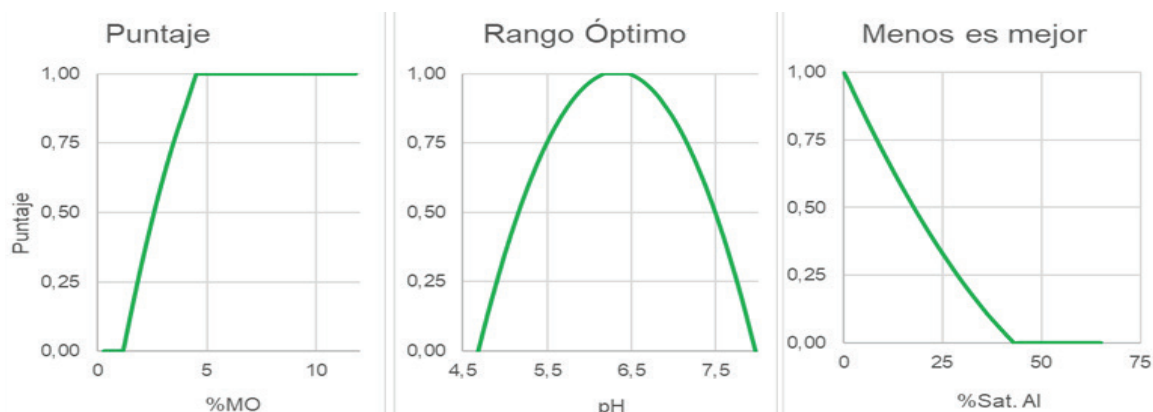


Figura 2. Tipos de funciones de puntaje para estandarizar las variables del ICNs en sitios cultivados con cacao en la cordillera nariñense.
Figure 2. Types of scoring functions used to standardize the NQIs variables in cocoa cultivated sites in the Nariño mountain range.

Tabla 3. Funciones de puntuación para cada propiedad de suelos, ajustadas a modelos cuadráticos.
Table 3. Scoring functions for each soil property, adjusted to quadratic models.












Variable	Ecuación de ajuste	R ²	
%MO	$y = -0,032x^2 + 0,4777x - 0,5233$	0,79	
Macronutrientes	P	$y = -0,0007x^2 + 0,0643x - 0,1825$	0,85
	K	$y = -2,2514x^2 + 3,5344x - 0,2813$	0,87
	Ca	$y = -0,0009x^2 + 0,0595x + 0,0152$	0,70
	Mg	$y = -0,0108x^2 + 0,2076x + 0,0595$	0,83
	Zn	$y = -0,0189x^2 + 0,2547x + 0,2525$	0,82
Micronutrientes	Mn	$y = -0,0101x^2 + 0,1736x + 0,337$	0,75
	Cu	$y = -2,2719x^2 + 5,7558x - 2,546$	0,81
	Fe	$y = -0,0014x^2 + 0,0779x - 0,1365$	0,71
	pH	$y = -0,3734x^2 + 4,7263x - 13,949$	0,73
%Sat, Al	$y = 0,0002x^2 - 0,032x + 1,0045$	0,95	

Posteriormente, el ICNs se determinó mediante la combinación o suma aritmética de los variables estandarizadas, siguiendo la ecuación [1]. Cada variable (I_i) recibió un peso relativo (W_i) para su ponderación. La asignación de los pesos relativos se realizó según la importancia de cada nutriente o atributo de suelo en el crecimiento y desarrollo del cultivo de cacao con base en lo expuesto por (Araujo et al., 2018) (Tabla 4).

$$ICNs = \sum_{i=1}^n I_i W_i \quad [1]$$

Tabla 4. Valores límite base y pesos estándar de las variables para la determinación del Índice de Calidad Nutricional en Suelos Cacaoteros (ICNs) de la cordillera nariñense, Colombia.

Table 4. Base limit values and standard weights of variables for determining the Nutritional Quality Index in Cocoa Soils (NQIs) of the Nariño Cordillera/mountain range, Colombia.

Indicador primario	Peso (%)	Indicador Secundario	Peso (%)	Valores límite base				Unidad	Tipo de función	Referencia
				Bajo	Medio	Óptimo	Alto			
MO	20			<2	2,0 - 3,0	-	3	%		Snoeck et al. (2016)
Macronutrientes	40	P	27,5	<6	6 - 15	-	>15	mg kg ⁻¹		Dogbatse et al. (2020)
		K	27,5	<0,15	0,15-0,4	-	>0,4	cmol (+) kg ⁻¹		Snoeck et al. (2016)
		Ca	22,5	<4	4-18	-	>18	cmol (+) kg ⁻¹		Dogbatse et al. (2020)
		Mg	22,5	<0,8	0,8-4,4	-	>4,4	cmol (+) kg ⁻¹		Snoeck et al. (2016)
Micronutrientes	25	Zn	50,0	-	<0,5	0,5-2,2	>2,2	mg kg ⁻¹		Snoeck et al. (2016)
		Mn	20,0	-	<3	3-12	>12	mg kg ⁻¹		Snoeck et al. (2016)
		Cu	20,0	-	<0,4	0,4-1,8	>1,8	mg kg ⁻¹		Dogbatse et al. (2020)
		Fe	10,0	-	<19	19-45	>45	mg kg ⁻¹		Snoeck et al. (2016)
pH	10			<5,0	5,0 - 5,5	5,5 - 7,0	>7,0	Ad.		Snoeck et al. (2016)
Sat. Al	5			<10	10-30	-	>30	%		Snoeck et al. (2016)

2.4. Análisis del ICNs de acuerdo con su ubicación geográfica

Para considerar las limitaciones frente al manejo de los suelos, así como otras características asociadas, los ICNs fueron agrupados según la distribución de las UCS (IGAC, 2004). Adicionalmente, para identificar y validar diferentes condiciones, se realizó un análisis exploratorio de la capacidad de retención de agua en el suelo y la resistencia mecánica a la penetración [RMP]. La curva de retención de humedad se realizó a muestras sin disturbar a través del método de ollas de presión y platos con membranas permeables. La RMP se midió con un penetrológger Eijkelkamp hasta una profundidad de 80 cm.

2.5. Identificación de la distribución espacial del ICNs

Se construyó un modelo de predicción del ICNs para estimar su valor en sitios no muestreados. El modelo se entrenó utilizando algoritmos de aprendizaje automático asistido por computadora (Machine learning). Para construir el modelo, se utilizaron 76 covariables ambientales, en formato ráster, asociadas a los factores de formación de suelos (Tabla 5). Se ajustó la resolución espacial de las covariables disponibles a un mismo tamaño de pixel, de 250 m x 250 m (ISRIC — World Soil Information, 2024) para garantizar la consistencia y uniformidad de las predicciones del ICNs. Posteriormente, mediante la estrategia de eliminación recursiva de variables [RFE], el conjunto de covariables se redujo a aquellas que mostraron mayor capacidad predictiva del ICNs (FAO, 2022).

Tabla 5. Covariables ambientales por factor de formación de suelo.
Table 5. Environmental covariates by soil formation factor.

No	Covariable	Descripción	Resolución (m)	Fuente
1 - 16	Clima	Temperatura, precipitación, evapotranspiración, velocidad del viento, número de días con temperatura promedio diaria del aire superior a 10 °C	1.000	Chelsa Climate (2023)
17 - 24	Índices de vegetación NDVI		250	
25 - 32	Fracción de radiación fotosintéticamente activa (FPAR)		500	
33 - 40	Temperatura superficial del suelo durante el día	Promedio y desviación estándar entre los meses marzo a mayo, junio a agosto, septiembre a noviembre, diciembre a febrero, del 2000 al 2022	1.000	
41 - 48	Diferencia normalizada de la temperatura superficial del suelo durante el día y la noche		1.000	Google for Developers (2023)
49	Albedo del cielo negro (promedio de junio a agosto de 2000 a 2022)		500	
50 - 54	Ocupación del suelo (NTR)	Probabilidad promedio estimada de cobertura completa por: árboles, arbustos y matorrales, vegetación inundada, pastizales, áreas desnudas.	250	
55 - 67	Atributos del terreno	Curvatura, elevación, rugosidad, pendiente, índice de posición topográfica, índice de humedad del terreno.	250	Yamazaki (2023)
68 - 76	Textura del suelo	Fracciones de arena, limo y arcilla. En profundidades 0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm	1.000	Varón-Ramírez et al. (2022)

Se entrenó un modelo predictivo a través del algoritmo Quantile Regression Forests [QRF] (FAO, 2022; Meinshausen, 2006) utilizando el paquete “caret” (FAO, 2022; Kuhn, 2008) en el software R-Studio. Una ventaja clave del QRF es su posibilidad de almacenar las predicciones de cada bosque construido en el algoritmo, permitiendo obtener una distribución estadística de esas predicciones. Esto posibilita calcular los promedios y desviaciones estándar de las predicciones.

Para las 65 covariables con mayor capacidad predictiva se determinaron, como medidas de tendencia, la raíz del error medio cuadrático [RMSE, en español REMC], el error medio absoluto [MAE, en español EMA] y el coeficiente de determinación (R^2).

Finalmente, se obtuvo el mapa de distribución espacial de la subregión cordillera de Nariño, y se delimitó a las áreas agrícolas utilizando información de coberturas de las tierras dispuesta por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2021).

3. Resultados y Discusión

3.1. Variables químicas de suelo

En los suelos dedicados al cultivo de cacao en la subregión de la cordillera de Nariño, se observó que el %MO varió entre el 0,31 % y el 20,29 % (Tabla 6). De acuerdo con León-Moreno et al. (2019), este 20,29 % supera el límite superior nacional establecido en un 13 %. Se identificó que el 40,19 % de los suelos analizados presentan un contenido de materia orgánica inferior al 2 %; esta situación puede afectar la liberación de N, P y S, así como la disponibilidad de Fe, Cu, Mn y Zn por acción quelatante (Julca-Otiniano et al., 2006). Asimismo, este comportamiento puede afectar negativamente el rendimiento de las plantaciones de cacao, logrando producir menos de 500 kg por hectárea al año (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2022; Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA], 2022). De acuerdo con este diagnóstico, resulta esencial la incorporación de materia orgánica al suelo. La aplicación de abonos orgánicos no solo contribuirá a mejorar este indicador del suelo, sino que también influirá positivamente en otros parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo (Amponsah-Doku et al., 2022).

Tabla 6. Resumen de los resultados del análisis descriptivo de los atributos de suelos en sitios cultivados con cacao en la cordillera nariñense.

Table 6. Summary of the results of the descriptive analysis of soil attributes in cocoa cultivated sites of the Nariño mountain range.

Variable	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación estándar
MOS (%)	0,31	2,90	20,29	2,33
P mg kg ⁻¹	1,29	9,73	81,70	11,74
K cmol (+) kg ⁻¹	0,09	0,28	1,07	0,21
Ca cmol (+) kg ⁻¹	0,28	9,00	37,15	6,91
Mg cmol (+) kg ⁻¹	0,13	3,24	13,31	2,94
Zn mg kg ⁻¹	1,00	1,69	17,14	2,00
Mn mg kg ⁻¹	1,00	5,54	33,23	4,79
Cu mg kg ⁻¹	1,00	3,61	19,16	2,42
Fe mg kg ⁻¹	5,00	75,65	249,25	51,43
pH	4,74	6,15	7,97	0,77
Sat, Al (%)	0,00	5,43	65,00	12,86

Por otro lado, se observó que el 30,37 % de los suelos analizados tienen un %MO mayor al 3 %. Dentro de este grupo, el 9,23 % se destaca por tener un %MO mayor al 10 %. Específicamente, estos suelos se localizan en la UCS MQA, en los municipios de Policarpa y El Rosario.

El pH varió de fuerte a extremadamente ácido (4,74) hasta alcalino (7,97) (Tabla 6). Según León-Moreno et al. (2019) esta variación es consistente con hallazgos en otras áreas cacaoteras del país. De acuerdo con este diagnóstico, es crucial implementar la práctica de encalado en los suelos que registran un pH menor a 5,5, dado que en estas condiciones se evidencia una posible toxicidad por aluminio y manganeso. Esta situación compromete la disponibilidad de nutrientes esenciales para el cultivo de cacao, generando un impacto negativo directo en el rendimiento de este (Jaimes Suárez et al., 2021).

El P osciló entre 1,29 mg kg⁻¹ y 81,7 mg kg⁻¹. León-Moreno et al. (2019) encontraron en otras áreas cacaoteras del país que este nutriente varía entre 0,1 y 334,9 mg kg⁻¹. No obstante, es importante señalar que la mera presencia de altas concentraciones de P no garantiza su disponibilidad para las plantas. En suelos con pH ácidos, este nutriente puede fijarse con el aluminio, Fe y Mn, mientras que, en suelos alcalinos, puede precipitarse debido a la presencia de Ca o Mg (Fernández, 2007). Por otra parte, el 23,36 % de los suelos analizados tienen un contenido de P inferior al 8 mg kg⁻¹. En situaciones como estas, León-Moreno et al. (2019) recomiendan elevar los niveles de este nutriente a más de 12 mg kg⁻¹ mediante la implementación de un enfoque integrado que incluya tanto fertilizantes orgánicos como químicos.

El K varió entre 0,09 cmol (+) kg⁻¹ y 1,07 cmol (+) kg⁻¹. Se identificó que el 31,30 % de estos suelos presentan niveles inferiores a 0,15 cmol (+) kg⁻¹. Esta baja concentración puede estar relacionada con el contenido de arcillas vermiculitas, cloritas o montmorillonitas entre 5 % y 15 %, la lixiviación del K debido al movimiento del agua en el suelo, suelos cultivados intensivamente, y minerales que retienen el K en forma no reemplazable (Mengel *et al.*, 2001). Según Hartemink (2005), la deficiencia de este nutriente puede tener implicaciones directas en la formación de las mazorcas de cacao.

El Ca osciló entre 0,28 cmol (+) kg⁻¹ y 37,15 cmol (+) kg⁻¹. Se encontró que el 24,50 % de estos suelos presentan niveles inferiores a 4 cmol (+) kg⁻¹. Este comportamiento puede estar asociado con los procesos de meteorización y lixiviación en la formación de estos suelos (Mengel *et al.*, 2001).

El Mg varió entre 0,13 cmol (+) kg⁻¹ y 13,31 cmol (+) kg⁻¹. El 16,35 % de estos suelos tienen niveles de este nutriente superiores a 4,4 cmol (+) kg⁻¹. Probablemente, este comportamiento esté relacionado con la presencia de minerales ferromagnesianos, como biotita, serpentina, olivina, etc. (Mengel *et al.*, 2001).

En relación con el Zn, Mn, Cu y Fe, se observó que las mayores concentraciones de estos micronutrientes pueden estar relacionadas con el origen del material parental con que se formaron (Mengel *et al.*, 2001).

3.2. Índice de calidad nutricional

En términos generales, el 70,6 % de los sitios se clasificaron con un ICNs medio, abarcando valores en el rango de 0,4 a 0,7, con un promedio de 0,50, mientras que el 23,8 % recibió una calificación baja y el 5,6 % obtuvo una calificación alta (Tabla 7 y Figura 3). Estas calificaciones medias y bajas del ICNs bajos y medios se correlacionan, según su aporte ponderado, con los niveles de MO y la disponibilidad de macronutrientes que, en promedio, están en el rango medio para el desarrollo del cultivo de cacao, como se evidenció en la Tabla 7.

Tabla 7. Resumen de puntuación del ICNs total y variables ponderadas en UCS principales.
Table 7. Summary of total NQIs score and weighted variables in main SCU.

UCS (n)	Descriptivo	ICNs	Valor ponderado de los indicadores primarios sobre el ICNs				
			% MO	Macronutrientes	Micronutrientes	pH	% S.Al
	Peso del indicador	100%	20%	40%	25%	10%	5%
PUA (56)	Mínimo	0,17	0,00	0,04	0,26	0,09	0,00
	Promedio	0,41	0,41	0,26	0,50	0,71	0,72
	Máximo	0,66	1,00	0,78	0,72	1,00	1,00
MQA (45)	Mínimo	0,31	0,00	0,10	0,40	0,06	0,00
	Promedio	0,55	0,58	0,43	0,53	0,85	0,93
	Máximo	0,82	1,00	0,82	0,78	1,00	1,00
MUA (12)	Mínimo	0,39	0,08	0,23	0,41	0,90	1,00
	Promedio	0,54	0,53	0,39	0,53	0,96	1,00
	Máximo	0,71	0,88	0,55	0,68	1,00	1,00
Total (143)	Mínimo	0,17	0,00	0,04	0,26	0,00	0,00
	Promedio	0,50	0,43	0,41	0,50	0,77	0,87
	Máximo	0,82	1,00	0,96	0,78	1,00	1,00

Es destacable que los sitios ubicados en las UCS MQA y MUA presentaron, en promedio, los índices más altos, aunque aún dentro del rango de calificación media con ICNs de 0,55 y 0,54 respectivamente. A pesar de estos valores superiores al promedio, estas UCS presentan limitaciones significativas, como la presencia de abundantes fragmentos de roca en el perfil y, fundamentalmente, por estar ubicados en pendientes pronunciadas, con gradiente superior al >25 % (IGAC, 2004). Las características topográficas de estas UCS contribuyen a la erosión en áreas desprovistas de vegetación, resultando en la pérdida de propiedades positivas del suelo en términos de calidad y disponibilidad de nutrientes.

Por otra parte, los sitios en la unidad PUA, que presenta mejores condiciones de relieve y accesibilidad, obtuvieron un ICNs promedio de 0,41, con un contenido muy bajo de MO y macronutrientes (P, K, Ca y Mg).

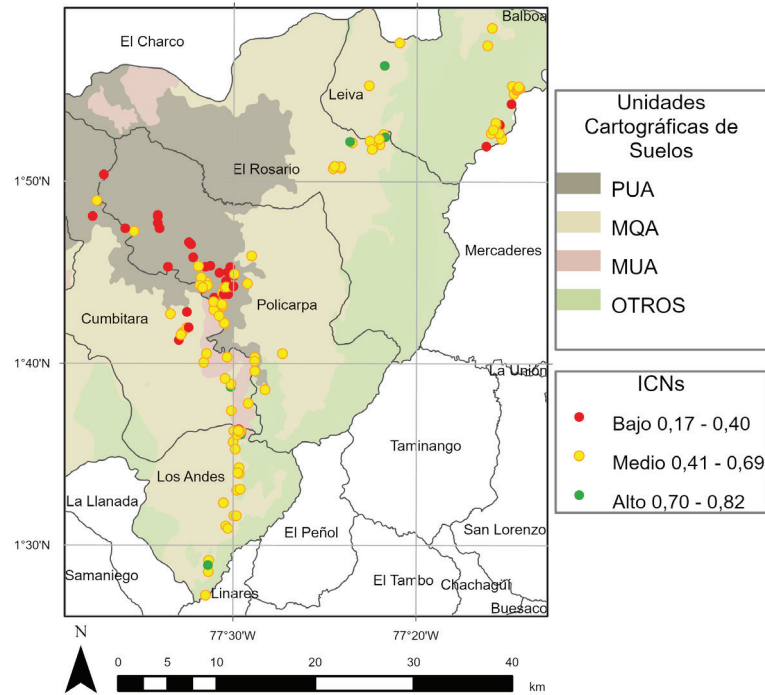


Figura 3. Ubicación espacial de los ICNs clasificados (Bajo 0,17-0,40; medio 0,41-0,69; alto 0,70-0,82).
Figure 3. Spatial distribution of classified NQIs (Low 0.17-0.40; Medium 0.41-0.69; High 0.70-0.82).

En la Figura 4 se muestra de manera exploratoria el comportamiento de la RMP evaluada en las UCS con la mayor cantidad de sitios muestreados. En la UCS PUA no hay limitaciones físicas a la profundidad efectiva de los suelos hasta 80 cm. En cambio, en las UCS MQA y MUA la prueba fue interrumpida entre 20 y 35 cm de profundidad, evidenciando limitantes a la profundidad efectiva de los suelos por abundantes fragmentos de roca, corroborando lo descrito por IGAC (2004).

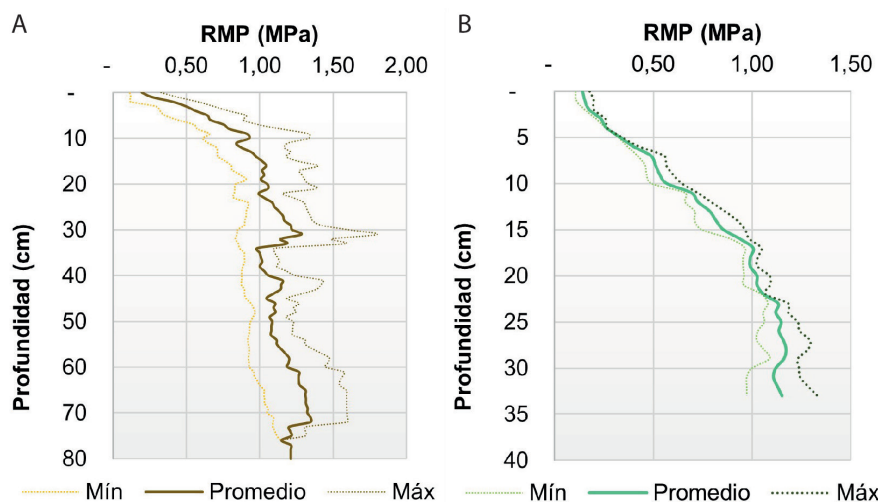


Figura 4. Resistencia mecánica a la penetración en las UCS principales. A UCS PUA; B. UCS MQA y MUA.
Figure 4. Mechanical Resistance to Penetration in the main SCU. A PUA SCU; B MQA and MUA SCU.

Por otro lado, la capacidad de retención de humedad fue mayor en las UCS MQA y MUA en comparación con la UCS PUA (Figura 5). Esto indica que el cultivo tiene una mayor disponibilidad de agua en el horizonte superficial del perfil de suelos en las unidades donde se encontraron los ICNs más altos. Esto está asociado al %MO, mayor en estas UCS, que contribuye a tener una mejor estructura y porosidad en los suelos y, asimismo, favorece una mejor disponibilidad y absorción de nutrientes para el desarrollo del cultivo.

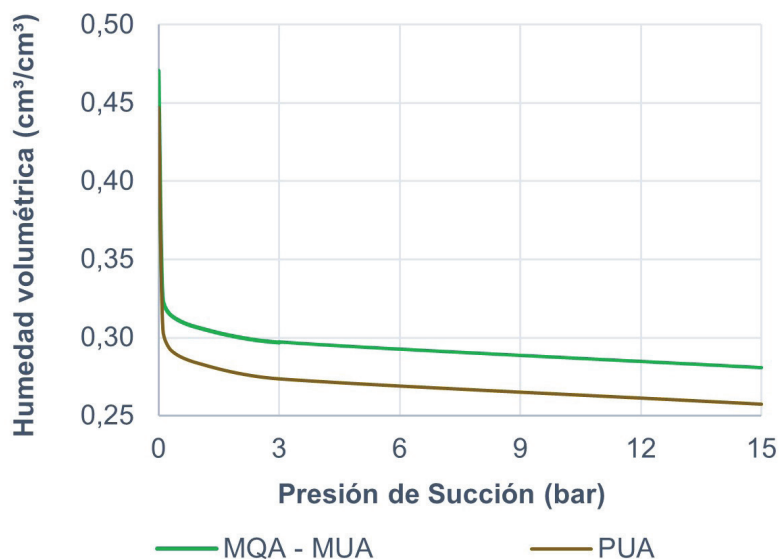


Figura 5. Curvas de retención de humedad en las UCS principales.

Figure 5. Moisture retention curves in the main SCU.

3.3 Distribución espacial del ICNs

La estrategia RFE redujo el conjunto de 76 covariables a 65, que mostraron mayor capacidad predictiva del ICNs con un menor RMSE de 0,098, un MAE de 0,078 y un R^2 de 0,424. Dentro de este subconjunto, se destacaron aquellas covariables asociadas con la fracción de radiación fotosintéticamente activa [FPAR], la diferencia normalizada de la temperatura superficial [NDLST], y el índice de diferencia de vegetación normalizado [NDVI]. Estas variables, relacionadas con la absorción solar para la fotosíntesis, la distribución de calor que afecta la evapotranspiración y la disponibilidad de agua, así como la cobertura vegetal que incide en la retención de nutrientes, fueron las que mostraron mayor capacidad para la predicción espacial del ICNs.

El modelo predictivo se construyó a través de 500 bosques aleatorios en los que se identificó que el menor error se obtiene cuando cada árbol se construye con 17 covariables que se seleccionan aleatoriamente dentro del subconjunto de 65 covariables. En cuanto al desempeño del modelo, se obtuvo un MAE de 0,09, un REMC de 0,11 y un coeficiente de correlación (r) de observados vs. predichos de 0,55 (Figura 6).

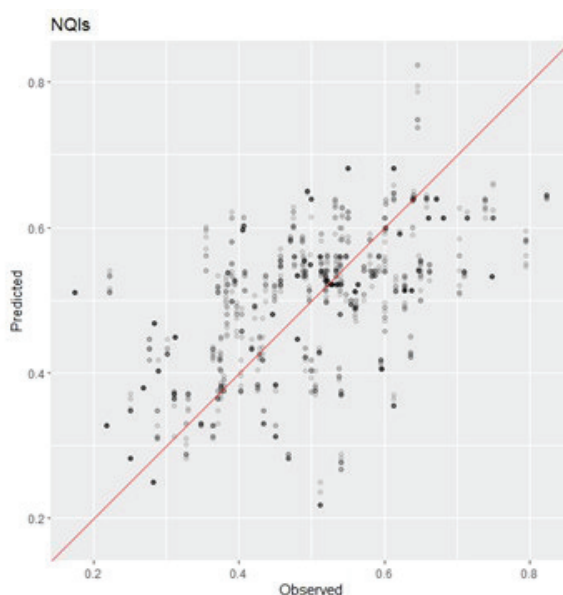


Figura 6. Gráfico del ICNs observados vs. predichos por el modelo. La línea roja representa el modelo perfecto.

Figure 6. Observed vs. Predicted NQIs by the model. The red line represents the perfect model.

En la Figura 7 se observa la distribución espacial del ICNs en las áreas agrícolas de la cordillera nariñense. Este mapa concuerda con lo reportado por Nási et al. (2023) quienes encontraron patrones similares de variabilidad del ICNs en áreas agrícolas. Por otra parte, los resultados se alinean con los hallazgos de Cherubin et al. (2019), quienes evaluaron la variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en seis usos de la tierra típicos (bosque, pastizal y cuatro sistemas agroforestales) utilizando el método de Evaluación Visual de la Estructura del Suelo [VESS] en el noroeste de la Amazonía colombiana, demostrando que estas herramientas pueden ser una estrategia para recuperar la calidad del suelo y reincorporar tierras degradadas en sistemas de producción productivos y sostenibles en las regiones amazónicas monitoreando los cambios físicos del suelo.

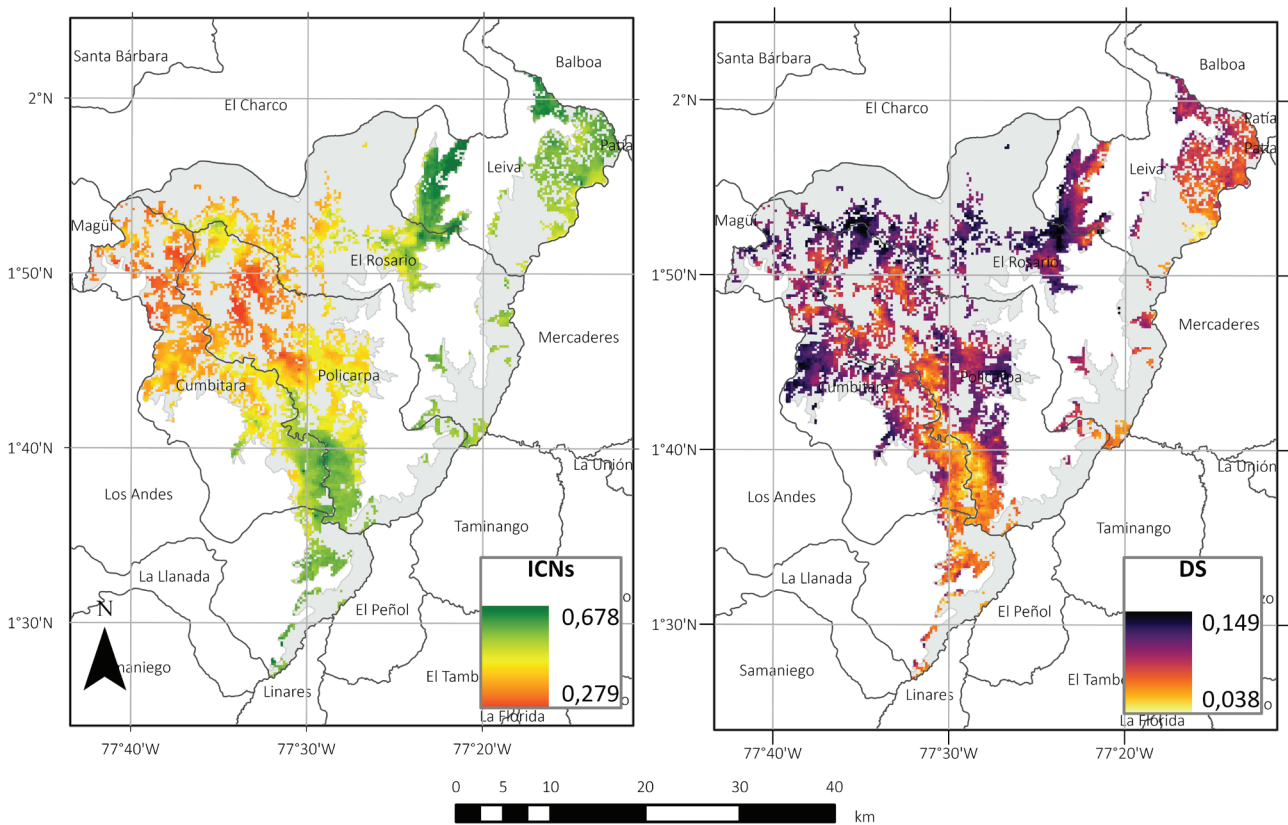


Figura 7. Izq. Distribución espacial del ICNs de las zonas agrícolas en la cordillera nariñense, Colombia. Der. Distribución espacial de la desviación estándar de la predicción.
Figure 7. Left. Spatial distribution of NQIs of the agricultural areas of the Nariño mountain range, Colombia. Right. Spatial distribution of prediction standard deviation.

Estas similitudes sugieren una tendencia generalizada en la distribución de la calidad del suelo en diversas regiones de América Latina. Este estudio complementa estos hallazgos al proporcionar una representación visual detallada de las áreas con mayor y menor aptitud para el cultivo de cacao, considerando la influencia de las condiciones ambientales en la calidad nutricional del suelo.

4. Conclusiones

El ICNs de la cordillera nariñense puede considerarse como una herramienta para evaluar la oferta nutricional de los suelos para el cultivo de cacao. Sin embargo, es importante complementarlo con otros atributos de suelo y factores ambientales para un monitoreo integral y aplicar estrategias de manejo que promuevan la sostenibilidad ambiental y los objetivos del sistema productivo.

La calidad nutricional de los suelos en la cordillera nariñense es heterogénea en el territorio y está influenciada por variaciones en el relieve, topografía y condiciones climáticas. Por lo tanto, es necesario definir estrategias de manejo de fertilización específicas, adaptadas a nichos de producción, para optimizar la vinculación de tecnologías con los productores locales.

La variabilidad del ICNs en la región no siempre se correlaciona con la uniformidad en los factores de formación del suelo. Esto puede atribuirse a que el ICNs, calculado según la metodología propuesta, se deriva principalmente de propiedades químicas influenciadas por las prácticas de fertilización y manejo del cultivo.

Este estudio puede ser base para definir nichos óptimos de producción de cacao en la región de la cordillera nariñense, proporcionando recomendaciones específicas de manejo agronómico sostenible adaptadas a las condiciones particulares de la agricultura familiar campesina en este territorio.

Agradecimientos

Se agradece a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA y Fundación Ayuda en Acción por el desarrollo del proyecto «Desarrollo de un modelo productivo de Cacao bajo en Cadmio para la Subregión de la Cordillera Nariñense».

Contribuciones de los autores

- Diego Leonardo Cortes-Delgado: conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.
- Jose Libardo Lerma-Lasso: curación de datos, investigación, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.
- Juan Fernando López: curación de datos, investigación, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.
- Diego Hernán Meneses: curación de datos, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.
- Eliana Martínez Pachón: conceptualización, metodología, administración del proyecto, redacción – revisión y edición.

Implicaciones éticas

Los autores declaran que no existen implicaciones éticas.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

- Amponsah-Doku, B., Daymond, A., Robinson, S., Atuah, L., y Sizmur, T. (2022). Improving soil health and closing the yield gap of cocoa production in Ghana – A review. *Scientific African*, 15, e01075. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01075>
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., y Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Araujo, Q., Ahnert, D., Loureiro, G., Faria, J., Fernandes, C., y Baligar, V. (2018). Soil quality index for cacao cropping systems. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(13), 1892-1909. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1467005>
- Arshad, M. A., y Coen, G. M. (1992). Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1/2), 25-31. <https://www.jstor.org/stable/44479646>
- Bautista-Cruz, A., de León-González, F., Carrillo-González, R., y Robles, C. (2011). Identification of soil quality indicators for maguey Mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) plantations in southern Mexico. *African Journal of Agricultural Research*, 6(20), 4795-4799. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.203>

- Baveye, P. C., Baveye, J., y Gowdy, J. (2016). Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. *Frontiers in Environmental Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., y Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Castillo-Valdez, X., Etchevers-Barra, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I., y Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: Generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39, e698. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>
- Castro Méndez, C. E., Guzmán Lugo, D. M., y Cortés Delgadillo, D. L. (2021). El almacenamiento y la disponibilidad de agua en la determinación del uso potencial de las tierras. *Revista GEOESPACIAL*, 18(1), 36-48. <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v18i1.1996>
- Chelsa Climate. (2023). *Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas*. <https://chelsa-climate.org/>
- Cherubin, M. R., Chavarro-Bermeo, J. P., y Silva-Olaya, A. M. (2019). Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1741-1753. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0282-y>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(1), e01. <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Cortés Lombana, A. (2014). *Reflexiones para edafólogos reconocedores en la etapa de los levantamientos semidetallados*.
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2022). *Colombia, potencia mundial de la vida. Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. DNP. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-02-06-Bases-PND-2023.pdf>
- Dogbatse, J. A., Arthur, A., Asare, E. K., Quaye, A. K., Konlan, S., Yeboah, S., y Addo, D. (2020). Physicochemical and biological properties of different Cocoa Pod Husk-based composts. *West African Journal of Applied Ecology*, 28(1), 46-60. <https://journals.ug.edu.gh/index.php/wajae/article/view/381>
- Doran, J. W., y Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. En W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, y B. A. Stewart (eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment, Volume 35* (pp. 1-21). SSSA Special Publication. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
- Fernández, M. T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar*, 41(2), 51-57. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223114970009>
- Figuroa Jáuregui, M. de L., Martínez Menez, M. R., Ortiz Solorio, C. A., y Fernández Reynoso, D. S. (2018). Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 36(3), 287-299. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.259>
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2022). *Country guidelines and technical specifications for global soil nutrient and nutrient budget maps – GSNmap: Phase I*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc1717en>
- Google for Developers. (2023). *Google Earth Engine*. <https://code.earthengine.google.com/>
- Grunwald, S., Thompson, J. A., y Boettinger, J. L. (2011). Digital soil mapping and modeling at continental scales: Finding solutions for global issues. *Soil Science Society of America Journal*, 75(4), 1201-1213. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0025>
- Hartemink, A. E. (2005). Nutrient stocks, nutrient cycling, and soil changes in cocoa ecosystems: A Review. *Advanced in Agronomy*, 86(1), 227-253. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)86005-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)86005-5)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2021). *Mapa de coberturas de la tierra*. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, Escala 1:100.000, periodo 2018. Index of /Cneideam/Capasgeo. <http://bart.ideam.gov.co/cneideam/Capasgeo/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Nariño*. IGAC.
- ISRIC — World Soil Information. (2024). *SoilGrids and WoSIS*. Soilgrids Information. <https://soilgrids.org/>
- Jaimés Suárez, Y. Y., Agudelo Castañeda, G. A., Báez Daza, E. Y., Rengifo Estrada, G. A., y Rojas Molina, J. (2021). *Modelo productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en el departamento de Santander*. AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.modelo.7404647>

- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147701>
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESIA*, 24(1), 49-61. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Kuhn, M. (2008). Building predictive models in R using the caret package. *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1-26. <https://doi.org/10.18637/JSS.V028.I05>
- Kuzyakov, Y., Gunina, A., Zamanian, K., Tian, J., Luo, Y., Xu, X., Yudina, A., Aponte, H., Alharbi, H., Ovsepyan, L., Kurganova, I., Ge, T., y Guillaume, T. (2020). New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(3), 282-288. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020338>
- León-Moreno, C. E., Rojas-Molina, J., y Castilla-Campos, C. E. (2019). Physicochemical characteristics of cacao (*Theobroma cacao* L.) soils in Colombia: Are they adequate to improve productivity? *Agronomía Colombiana*, 37(1), 28-38. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n1.70545>
- Meinshausen, N. (2006). Quantile Regression Forests. *Journal of Machine Learning Research*, 7, 983-999. <https://jmlr.org/papers/v7/meinshausen06a.html>
- Mengel, K., Kirkby, E. A., Kosegarten, H., y Appel, T. (rds.). (2001). *Principles of Plant Nutrition*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2020). *Estrategia de ordenamiento de la producción: Cadena productiva del cacao y su industria*. Viceministerio de Asuntos Agropecuarios, Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. <https://sioc.minagricultura.gov.co/DocumentosContexto/S4128-Plan OP Cacao 2020.pdf>
- Näsi, R., Mikkola, H., Honkavaara, E., Koivumäki, N., Oliveira, R. A., Peltonen-Sainio, P., Keijälä, N. S., Änäkälä, M., Arkkola, L., y Alakukku, L. (2023). Can basic soil quality indicators and topography explain the spatial variability in agricultural fields observed from drone orthomosaics? *Agronomy*, 13(3), 669. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030669>
- Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025:2006. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. <http://www.saludcapital.gov.co/CTDLab/Publicaciones/2015/Norma tecnica colombiana 17025.pdf>
- Obando Moncayo, F. H. (2016). Herramientas conceptuales y tecnológicas para la evaluación de calidad inherente del suelo y la implementación de paisajes productivos multifuncionales en el trópico. *Suelos Ecuatoriales*, 46(1 y 2), 31-41. http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuatoriales/article/view/63
- Papić, M. (2016). A combined multi-criteria approach of soil quality analysis. *Romanian Journal of Physics*, 61(9-10), 1577-1590. https://rjp.nipne.ro/2016_61_9-10/RomJPhys.61.p1577.pdf
- Rojas-Molina, J., Ortiz-Cabrera, L., Escobar-Pachajoa, L. D., Rojas-Buitrago, M., y Jaimes-Suárez, Y. Y. (2021). Descomposición y liberación de nutrientes en biomasa por poda de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Rionegro, Santander, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 32(3), 888-900. <https://doi.org/10.15517/AM.V32I3.41608>
- Şeker, C., Özyaytekin, H. H., Negiş, H., Gümüş, I., Dedeoğlu, M., Atmaca, E., y Karaca, Ü. (2017). Assessment of soil quality index for wheat and sugar beet cropping systems on an entisol in Central Anatolia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4), 135. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5848-z>
- Seybold, C. A., Herrick, J. E., y Brejda, J. J. (1999). Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Science*, 164(4), 224-234. https://journals.lww.com/soilsci/abstract/1999/04000/soil_resilience__a_fundamental_component_of_soil.2.aspx
- Seybold, C. A., Mausbach, M. J., Karlen, D. L., y Rogers, H. H. (2018). Quantification of soil quality. En R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follett, y B. A. Stewart (eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle* (pp. 387-404). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203739273>
- Snoeck, D., Koko, L., Joffre, J., Bastide, P., y Jagoret, P. (2016). Cacao nutrition and fertilization. En: E. Lichtfouse (ed.), *Sustainable Agriculture Reviews* (vol 19) (pp. 155-202). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_4
- Soil Survey Staff. 2014. *Claves para la Taxonomía de Suelos* (12ª ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Trinidad, F. W., Sol-Sánchez, Á., y Galindo-Alcántara, A. (2016). Evaluación de la rentabilidad económica y captura de carbono en plantaciones de cacao en el plan Chontalpa, Tabasco. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y cambio climático*, 2(1), 53-71. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5680>

- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2022). *Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria, SIPRA*. <https://sipra.upra.gov.co/nacional>
- Vargas Díaz, R. E., Galindo Pacheco, J. R., Giraldo Henao, R., Varón Ramírez, V. M., Wilches Ortiz, W. A., y Franco Flórez, C. V. (2023). Metodologías de interpolación y predicción espacial para el análisis de las propiedades físicas del suelo en la hoya del río Suárez (Colombia). *Siembra*, 10(1), e4118. <https://doi.org/10.29166/siembra.v10i1.4118>
- Varón-Ramírez, V. M., Araujo-Carrillo, G. A., y Guevara Santamaría, M. A. (2022). Colombian soil texture: building a spatial ensemble model. *Earth System Science Data*, 14(10), 4719-4741. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4719-2022>
- Villareal-Núñez, J., Pla-Sentis, I., Agudo-Martínez, L., Villalaz-Pérez, J., Rosales, F., y Pocasangre, L. (2013). Índice de calidad de suelo en áreas cultivadas con Banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 301-315. <https://doi.org/10.15517/am.v24i2.12530>
- Yamazaki, D. (2023). *MERIT DEM: Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM*. http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/
- Zinck, J. A. (2012). *Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. https://museosuelos.ciga.unam.mx/Para_leer/Geopedologia.pdf