

MAPA DIGITAL DE
FERTILIDAD QUÍMICA
DE LOS SUELOS DEL ECUADOR CONTINENTAL

MEMORIA TÉCNICA
2022

COORDINACIÓN GENERAL DE
INFORMACIÓN NACIONAL AGROPECUARIA



SERVIR  AMAZONIA



Ministerio de
Agricultura y Ganadería



GUILLERMO LASSO
PRESIDENTE

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)

Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria
Dirección de Generación de Geoinformación Agropecuaria

**Alianza de Bioversity International y el Centro Internacional
de Agricultura Tropical -CIAT- (Alianza Bioversity-CIAT)**
Paisajes multifuncionales

Ing. Bernardo Juan Manzano Díaz
Ministro de Agricultura y Ganadería (MAG)

Ing. Jesús Quintana García, MSc.
Director Gerente para las Américas de la Alianza Bioversity-CIAT

Carlos Jesús Gasco
Director Programa SERVIR-Amazonia

Ing. Ángela Vásconez, MSc.
Coordinadora General de Información Nacional Agropecuaria (CGINA)

Ing. César Trajano Yugcha
Director de Generación de Geoinformación Agropecuaria (DGGA)

Equipo técnico

Javier Martín (Coordinador técnico, Alianza Bioversity-CIAT)
Wilmer Jiménez (Líder Unidad de Suelos, Punto Focal Ecuador, MAG-CGINA-DGGA)
Juan Caicedo (Alianza Bioversity-CIAT)
Oscar Calahorrano (Unidad de Suelos, MAG-CGINA-DGGA)
Mayesse da Silva (Científica y líder del proyecto, Alianza Bioversity-CIAT)

Diseño de la portada

Diego Cando, MAG-CGINA-DGGA

Mapa digital de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental

Memoria Técnica

Cita recomendada:

Alianza Bioversity–CIAT, MAG. 2022. *Mapa digital de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental. Memoria Técnica.* Quito, Ecuador. Disponible en:
<http://geoportal.agricultura.gob.ec/>



Esta obra se encuentra disponible bajo la licencia de Creative Commons Attribution Non Commercial-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/legalcode>). Bajo los términos de esta licencia, esta obra podrá ser copiada, redistribuida y adaptada con fines no comerciales a condición de que la obra sea citada apropiadamente.

Con el apoyo de:

SERVIR  **AMAZONIA**



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA




Alianza
Bioversity & CIAT




ecociencia

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. Objetivo general.....	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. MATERIALES Y MÉTODOS	3
3.1. Flujograma metodológico	3
3.2. Área de estudio	4
3.3. Datos y procesamiento.....	5
3.3.1. Datos de suelos	5
3.3.2. Covariables ambientales.....	7
3.4. Mapeo de las propiedades del suelo.....	9
3.4.1. Selección de covariables	9
3.4.2. Predicción espacial	10
3.4.3. Evaluación de la incertidumbre	11
3.5. Mapa de fertilidad química	11
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
4.1. Estadísticas descriptivas de los datos de campo	13
4.2. Resultados de la modelación.....	15
4.3. Distribución espacial e incertidumbre de las propiedades del suelo.....	18
4.3.1. Materia orgánica.....	19
4.3.2. pH.....	21
4.3.3. Potasio disponible	23
4.3.4. Fósforo disponible	25
4.3.5. Capacidad de Intercambio Catiónico	27
4.3.6. Suma de bases	30
4.3.7. Saturación de bases	31
4.3.8. Conductividad eléctrica.....	33
4.3.9. Textura de los suelos	35
4.4. Mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental.....	38
4.5. Fertilidad de los suelos de la Amazonía	42
5. CONCLUSIONES.....	44
6. REFERENCIAS	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de covariables medioambientales colectadas para el modelamiento	8
Tabla 2. Rangos de interpretación para clasificación y asignación de puntajes a las propiedades químicas de los suelos.	12
Tabla 3. Estadísticas descriptivas de las propiedades fisicoquímicas de los suelos del Ecuador continental.....	13
Tabla 4. Tabla de estadísticas descriptivas y resultados del modelo.....	15
Tabla 5. Tabla de importancia de covariables	18
Tabla 6. Superficie en porcentaje a nivel provincial de la fertilidad química de los suelos del Ecuador continental	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma metodológico del desarrollo del mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental.....	3
Figura 2. (a) Ubicación del área de estudio y regiones geográficas; (b) cobertura de la tierra del Ecuador continental.....	4
Figura 3. Taxonomía de suelos del Ecuador continental	5
Figura 4. (a) Distribución espacial y (b) Mapa de calor de los perfiles de suelos empleados en el mapeo digital de los suelos.....	7
Figura 5. Diagramas de caja de los valores de las propiedades del suelo	14
Figura 6. Covariables más empleadas en la predicción espacial de las propiedades fisicoquímicas de los suelos del Ecuador.....	17
Figura 7. (a) Mapa de predicción de la Materia orgánica (MO) y (b) Mapa de incertidumbre	20
Figura 8. (a) Mapa de Materia orgánica (MO) clasificada y (b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional.....	21
Figura 9. (a) Mapa de predicción del pH (pHAQ) y (b) Mapa de incertidumbre	22
Figura 10. (a) Mapa de pH (pHAQ) clasificado y (b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional	23
Figura 11. (a) Mapa de predicción del Potasio disponible (KDIS) y (b) Mapa de incertidumbre	24
Figura 12. (a) Mapa de Potasio disponible (KDIS) clasificado y (b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional	25
Figura 13. (a) Mapa de predicción del fósforo disponible (PDIS) y (b) Mapa de incertidumbre	26
Figura 14. (a) Mapa de fósforo disponible (PDIS) y (b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional	27
Figura 15. (a) Mapa de predicción de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y (b) Mapa de incertidumbre	28
Figura 16. (a) Mapa de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) clasificado y (b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional	29
Figura 17. (a) Mapa de predicción de la Suma de Bases (SBCC) y (b) Mapa de incertidumbre	30
Figura 18. (a) Mapa de la Suma de Bases (SBCC) clasificado y (b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional	31
Figura 19. (a) Mapa de predicción de la Saturación de Bases (SatCC) y (b) Mapa de incertidumbre	32
Figura 20. (a) Mapa de Saturación de Bases (SatCC) clasificado y (b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional	33

Figura 21. (a) Mapa de predicción de Conductividad Eléctrica (CEAQ) y (b) Mapa de incertidumbre	34
Figura 22. (a) Mapa de Conductividad Eléctrica (CEAQ) clasificado y (b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional	35
Figura 23. (a) Mapa de predicción de arcilla y (b) Mapa de incertidumbre	36
Figura 24. (a) Mapa de predicción de arena y (b) Mapa de incertidumbre	37
Figura 25. Mapa nacional de clases texturales de suelos	38
Figura 26. Mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental, resolución espacial 30 m.....	39
Figura 27. Superficie en porcentaje por región de la fertilidad química de los suelos del Ecuador continental	40
Figura 28. Mapa de fertilidad química de los suelos de la Amazonía ecuatoriana a los 30cm de profundidad de suelo, resolución espacial 30 m	43

ACRÓNIMOS

CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
DGGA	Dirección de Generación de Geoinformación Agropecuaria
CGINA	Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
USAID	Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
INIAP	Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
ESA	Agencia Espacial Europea
IEE	Instituto Espacial Ecuatoriano
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
SIG	Sistemas de Información Geográfica
GEE	Google Earth Engine
SAGA	Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos
RF	Random Forest
VSURF	Variable Selection Using Random Forests
QRF	Quantile Regression Forests
WGS	World Geodetic System
UTM	Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
MAE	Error Absoluto Medio
RMSEn	RMSE normalizado por el valor medio de los datos observados

ABREVIATURAS

MO	Materia Orgánica
pH	Potencial de hidrógeno
pHAQ	pH en agua
KDIS	Potasio disponible
PDIS	Fósforo disponible
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
SBCC	Suma de Bases
SatCC	Saturación de Bases
CEAQ	Conductibilidad eléctrica en agua
MDS	Mapeo Digital de Suelos
DEM	Modelo Digital de Elevación
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
K	Potasio
P	Fósforo
Mo	Molibdeno
Zn	Zinc
Na	Sodio
Fe	Hierro
Al	Aluminio
Mn	Manganeso
B	Boro
H	Hidrógeno
BSI	Índice de suelo desnudo
GRVI	Índice de vegetación verde-rojo
MSI	Índice de estrés por humedad
NBRI	Índice Normalizado de Área Quemada
NDMI	Índice de Humedad de Diferencia Normalizada
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
SAVI	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo
LS	Factor longitud-pendiente
MRRTF	Multi-resolution ridge top flatness
MRVBF	Multi-resolution valley bottom flatness
RSP	Posición relativa de la pendiente
TPI	Índice de posición topográfica
Eds.	Editores
máx.	Máximo
mín.	Mínimo
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
pp.	Páginas
%	Porcentaje
Un	Unidad
cm	Centímetro
dS	Decisiemens
mg	Miligramo
kg	Kilogramo
cmol	Centimol
km ²	Kilómetro cuadrado
m	Metro
mm	Milímetro

DECLARACIONES

El 25 de enero de 2021, el **Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) del Gobierno de la República del Ecuador, la Alianza de Bioversity International y el Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT - (Alianza Bioversity-CIAT)** y la **Fundación ECOCIENCIA**, firmaron un Memorándum de Entendimiento en el marco del Programa **SERVIR-Amazonia**, mediante el cual, las tres instituciones se comprometieron a combatir la degradación de los suelos en el territorio nacional. Bajo este acuerdo, la Alianza Bioversity-CIAT y MAG a través de la **Unidad de Suelos de la Dirección de Generación de Geoinformación Agropecuaria (DGGA)** de la **Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria (CGINA)**, desarrollaron el Mapa Digital de Fertilidad Química de los Suelos del Ecuador continental.

El **Ministerio de Agricultura y Ganadería** es la institución rectora y ejecutora de las políticas públicas agropecuarias en el Ecuador. Promueve la productividad, competitividad y sanidad del sector, con responsabilidad ambiental a través del desarrollo de las capacidades técnicas organizativas y comerciales a los productores agropecuarios a nivel nacional con énfasis a los pequeños, medianos y los de la agricultura familiar campesina, contribuyendo a la soberanía alimentaria.

La **Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria (CGINA)** del MAG tiene como misión “generar, administrar, proveer y difundir información oportuna y consistente al sector público y privado en el ámbito agropecuario, generando indicadores, análisis e informes que permitan la toma de decisiones en el sector”.

La **Alianza Bioversity-CIAT** brinda soluciones científicas que abordan las crisis mundiales de malnutrición, cambio climático, pérdida de la biodiversidad y degradación ambiental. La Alianza se enfoca en el nexo entre agricultura, nutrición y medio ambiente. Trabaja con socios locales, nacionales y multinacionales en países de Latinoamérica y el Caribe, África, y Asia, así como con los sectores público, privado y la sociedad civil.

La **Fundación ECOCIENCIA** es una entidad científica ecuatoriana, privada y sin fines de lucro, fundada en 1989 con el ánimo de generar información de calidad para la toma de las mejores decisiones en favor de la conservación de la biodiversidad y el bienestar de la población.

SERVIR-Amazonia forma parte de SERVIR Global, una iniciativa conjunta de desarrollo entre la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). Desde 2005, SERVIR viene trabajando en asociación con diversos países del mundo para promover el uso de información que brindan los satélites de observación terrestre y de tecnologías geoespaciales.

Liderado por la Alianza de Bioversity International y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), SERVIR-Amazonia es el más reciente de los cinco centros regionales que opera SERVIR. Se trata de un programa de cinco años (2019-2023) que reúne conocimiento local y lo mejor de la ciencia en tecnología geoespacial y observación del planeta Tierra. SERVIR-Amazonia trabaja junto a socios regionales para entender mejor las necesidades de la región, y así desarrollar herramientas, productos y servicios que permitan a los países que conforman la cuenca amazónica, mejorar la toma de decisiones e incorporar a ella, de manera más adecuada, la voz de las mujeres, y de los pueblos indígenas.

AGRADECIMIENTOS

Extendemos un agradecimiento a todas las personas y organizaciones que directa o indirectamente contribuyeron en el desarrollo de ese servicio. Al programa SERVIR-Amazonia, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) por proveer el apoyo financiero y logístico necesario para la ejecución de este proyecto. A la Alianza Bioversity-CIAT y a la Dirección de Generación de Geoinformación Agropecuaria DGGA-CGINA-MAG por su contribución técnica y logística. A la fundación ECOCIENCIA por su apoyo logístico y de divulgación pública. A Yamil Cartagena (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias -INIAP) por su asesoría científica. A todo el equipo del Geoportal del Agro Ecuatoriano: Maritza Saavedra, Daniela Manzano, Diego Cando, Sylvia Huilcamagua y Fabián Luna, por su apoyo en la publicación online de los productos. A Darwin Sánchez, por su aporte técnico y profesional al inicio del proyecto. Finalmente, un agradecimiento a todas las personas que con sus diferentes acciones y aportes permitieron el desarrollo de este servicio.

Esta publicación ha sido posible gracias al apoyo del pueblo de los Estados Unidos a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). El contenido de esta publicación es responsabilidad de sus autores y no necesariamente refleja los puntos de vista de USAID o del Gobierno de los Estados Unidos de América.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los recursos clave en todo el mundo, ya que sirve como fuente y reserva de nutrientes, agua, oxígeno y soporte para las plantas. El suministro de nutrientes varía espacialmente en función de los factores que conforman el suelo y del uso y manejo que se le dé. El uso agrícola continuo y sin prácticas de manejo sostenibles puede llevar el suelo al agotamiento afectando la salud del suelo y el rendimiento de los cultivos, por lo cual la cuantificación y mapeo de la disponibilidad de nutrientes y el estado de fertilidad en cada lugar se convierte en una herramienta clave para el monitoreo, mejoramiento y conservación de la salud del suelo. En este documento presentamos el Mapa Digital de Fertilidad Química de los Suelos del Ecuador continental. Este mapa fue desarrollado con el objetivo de apoyar el diagnóstico, seguimiento y control de la degradación de los suelos del Ecuador y se enmarca dentro de las áreas temáticas de Cobertura del Suelo, y Cambio de Uso del Suelo y Ecosistemas del programa SERVIR-AMAZONIA.

La fertilidad del suelo es definida como la capacidad de un suelo para sostener el crecimiento de las plantas al proporcionar nutrientes esenciales y características favorables como hábitat para el crecimiento de las plantas [1]. La fertilidad del suelo integra atributos físicos, químicos y biológicos del suelo [2]. En este estudio se emplearon solamente atributos químicos para definir los indicadores y clasificación de la fertilidad. Los atributos seleccionados fueron: materia orgánica (%), pH en agua (Un), fósforo disponible (mg/kg), potasio disponible (cmol/kg), capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg), suma de bases (cmol/kg), saturación de bases (%) y conductividad eléctrica (dS/m). Adicionalmente se mapeó la textura de los suelos, la cual es una propiedad directamente relacionada al potencial de producción de los suelos, esencial en la definición de las prácticas de manejo y una correcta planificación de los suelos [3].

La predicción espacial de la fertilidad de los suelos en sitios donde no existe información puede ser llevada a cabo a través de modelos basados en Mapeo Digital de Suelos (MDS). MDS es el desarrollo asistido por computadora para la creación de mapas de clases de suelo y propiedades, mediante la combinación de diferentes covariables ambientales y datos del suelo (recolectados en el campo) en un modelo matemático/estadístico para producir mapas de alta resolución que sean continuos y variables en el espacio [4,5].

El proceso de generación del mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental incluyó las siguientes fases: **1)** armonización y selección de covariables ambientales; **2)** recolección, limpieza y estandarización de datos existentes de perfiles de suelos del país; **3)** modelización espacial de las propiedades clave en la fertilidad química del suelo y su incertidumbre; **4)** clasificación de los mapas de propiedades del suelo y la creación del mapa de fertilidad química del suelo.

Este mapa constituirá una herramienta efectiva en la toma de decisiones informada y apoyada en datos para direccionar las estrategias que permitan tener suelos fértiles y saludables; para minimizar los impactos del cambio de uso del suelo; incrementar su productividad sin generar degradación; apoyar al pequeño agricultor, garantizando la seguridad y soberanía alimentaria, además de reducir los índices de pobreza.

Los productos generados a partir de este desarrollo se encuentran en el Geoportal del Agro Ecuatoriano del MAG para su libre acceso: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Generar el mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental para apoyar el diagnóstico, seguimiento y control de la degradación de los suelos.

2.2. Objetivos específicos

- Fortalecer las capacidades en mapeo digital de suelos de los expertos en suelos del MAG.
- Generar mapas de propiedades clave del suelo a partir de los perfiles de suelo colectados a nivel nacional.
- Generar mapas de incertidumbre de los mapas de predicción de las propiedades clave.
- Identificar las zonas con mayor y menor fertilidad a nivel nacional.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Flujo metodológico

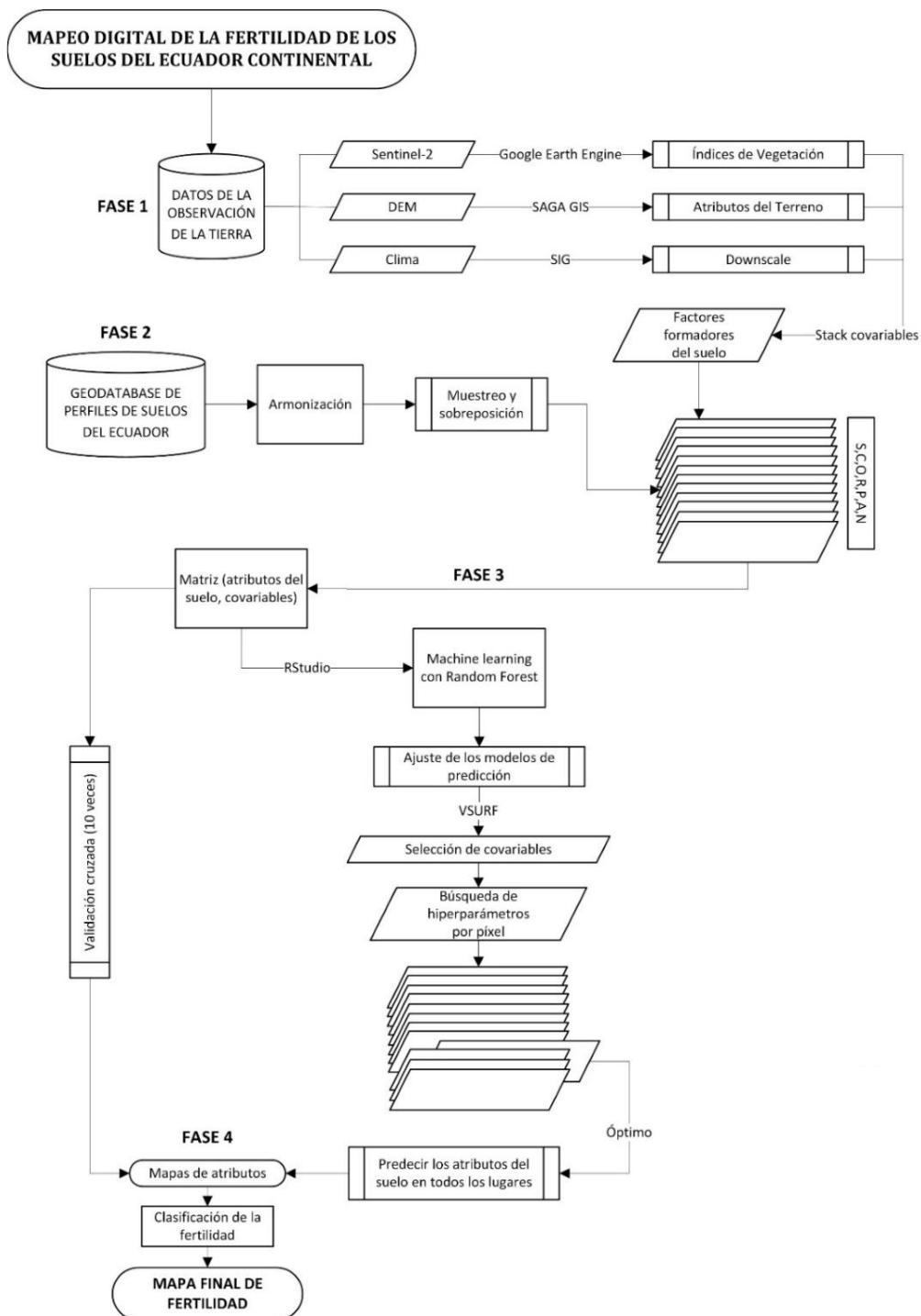


Figura 1. Flujo metodológico del desarrollo del mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental.

Como se presenta en el flujograma metodológico (Figura 1), el proceso de generación del mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental, se realizó en cuatro fases: **1)** armonización y selección de covariables ambientales; **2)** recolección, limpieza y estandarización de datos existentes de perfiles de suelos del país; **3)** modelización espacial de las propiedades clave en la fertilidad química del suelo y su incertidumbre; **4)** clasificación de los mapas de propiedades del suelo y la creación del mapa de fertilidad química del suelo.

3.2. Área de estudio

El área de estudio comprende el territorio continental del Ecuador (~ 249.000 km²), ubicado al noroeste de América del Sur entre latitudes 05°00'56" Sur - 01°21'10.50 Norte y longitudes 75°11'49" - 81° 04' Oeste. Atravesado por los Andes de sur a norte, el país se divide en tres regiones geográficas (Figura 2a): “la Costa”, la zona costera del oeste; “la Sierra”, la zona montañosa y central; y “la Amazonía”, las tierras bajas orientales que forman parte de la cuenca del Amazonas. Estas regiones se caracterizan por un complejo y variado sistema de climas, paisajes, suelos y una gran biodiversidad, producto de la conjunción del carácter ecuatorial de la zona y la elevación [6]. La cobertura vegetal del territorio (Figura 2b) está principalmente compuesta en su nivel 1 [7] por tierra forestal (54.8%), tierra agropecuaria (26.6%), tierra arbustiva y herbácea (14.6%), zona antrópica (1.9%), cuerpos de agua (1.0%) y otras tierras que incluyen tierra sin cobertura vegetal (0.7%) y zonas sin información (0.4%).

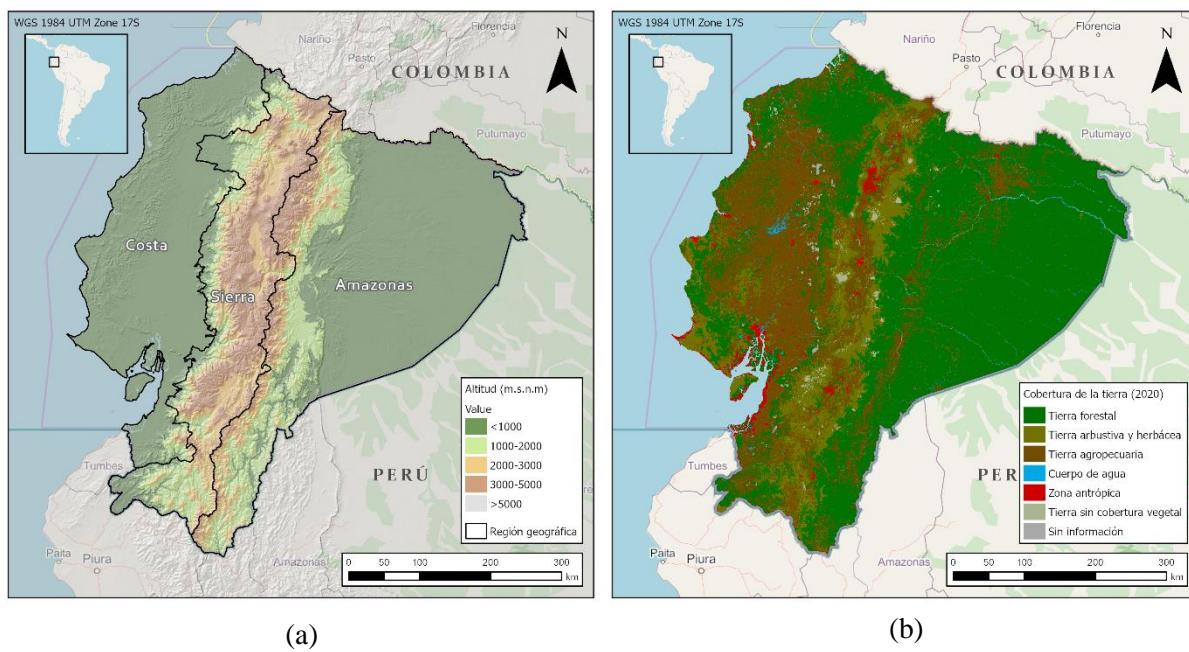


Figura 2. (a) Ubicación del área de estudio y regiones geográficas;
(b) cobertura de la tierra del Ecuador continental [8]

En el Ecuador continental están presentes diez de los 12 órdenes de suelos (Figura 3) descritos por la USDA Soil Taxonomy [9]. Los Inceptisoles están presentes en las tres regiones

geográficas ocupando un 40 % de la superficie total del país; le siguen los Andisoles con un 22 %, presentes principalmente en la Sierra y Costa y muy poco en la Amazonía; los Ultisoles representan el 10 % y se los encuentra principalmente en el oeste de la Amazonía; los Mollisoles con un 8 % están presentes en la Sierra y parte de la Costa; los Entisoles están presentes en las tres regiones, sin embargo sólo representan el 7 % del territorio; en menor porcentaje (< 5 %) y en orden descendente, se encuentran los Alfisoles, Vertisoles, Aridisoles, Oxisoles e Histosoles [10].

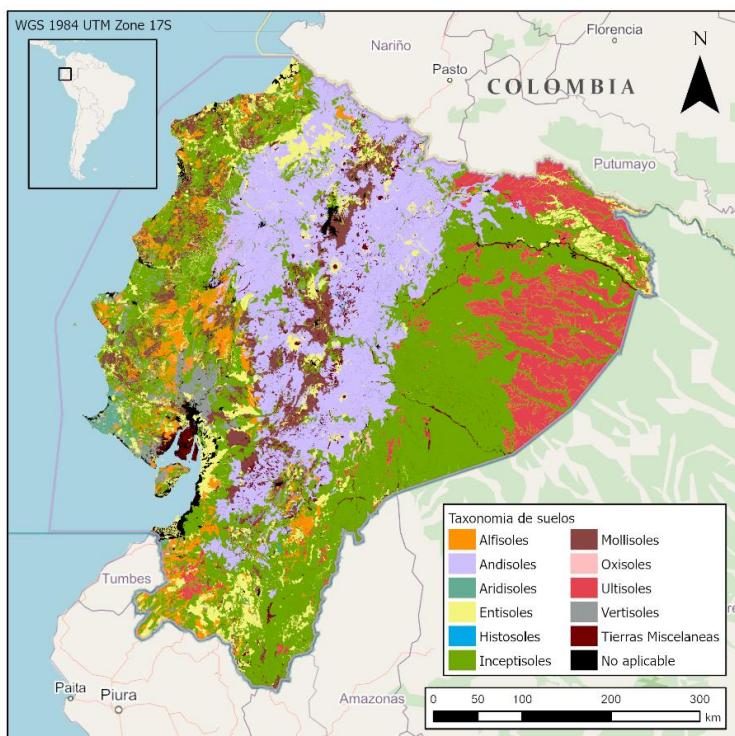


Figura 3. Taxonomía de suelos del Ecuador continental

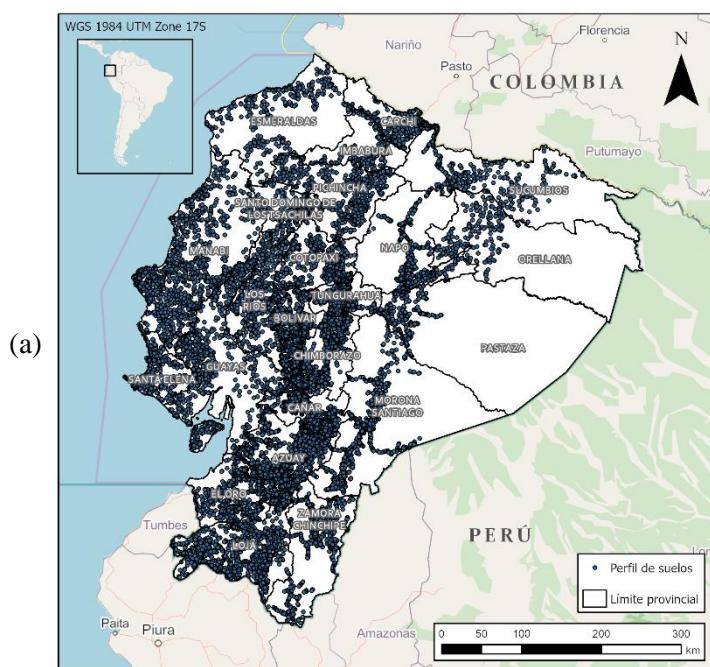
3.3. Datos y procesamiento

3.3.1. Datos de suelos

Más de 13.800 perfiles de suelo, colectados entre 2009 y 2015 por varias instituciones del Estado, como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) y la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES), fue empleada como información base en la selección de los sitios y propiedades del suelo a ser empleadas en el mapeo [8] Esta base de datos que incluye la caracterización fisicoquímica de cada perfil por horizonte, su posición geográfica, información topográfica, clasificación taxonómica de suelos, entre otros, fue sujeta a un proceso de limpieza, eliminando aquellas propiedades con muestras insuficientes, perfiles incompletos, errores de georreferenciación y resultados de laboratorio. Finalmente se seleccionaron un total de 13.476 perfiles de suelos

(Figura 4a) como observaciones de campo y se definieron las siguientes propiedades fisicoquímicas del suelo a ser mapeadas: **Materia Orgánica (%)** determinada a partir del método de Walkley & Black [11]; **pH (Un)** a partir del potenciométrico en agua (1:2.5); **Fósforo disponible (mg/kg)** y **Potasio disponible (cmol/kg)** por el método de Olsen a pH = 8.6 y 8.7, respectivamente; la **capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg)** y la **suma de bases (cmol/kg)** por medio del Acetato de Amonio a pH = 7 y 8, respectivamente; la **saturación de bases (%)** a partir del siguiente cálculo analítico: $\sum(Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, y Na^+)/CIC$; la **conductibilidad eléctrica (dS/m)** empleando el conductímetro en agua (1:2.5) y la **arcilla (%)** y **arena (%)** a partir del método de Bouyoucos[12].

Los perfiles de suelos fueron recolectados durante diferentes proyectos y bajo diferentes objetivos, sin ser contemplados inicialmente para su uso en MDS, resultando en una distribución espacial y una densidad de muestreo variable a lo largo del país. En la Figura 4b, se representa la densidad de muestreo a través de un mapa de calor, en la cual se identifican las áreas con una mayor densidad de muestreo como las provincias de Azuay, Cañar, Chimborazo, Bolívar y Tungurahua pertenecientes a la región de la Sierra y otras con ausencia de sitios de muestreo como Pastaza, Orellana y Sucumbíos en la región de la Amazonía.



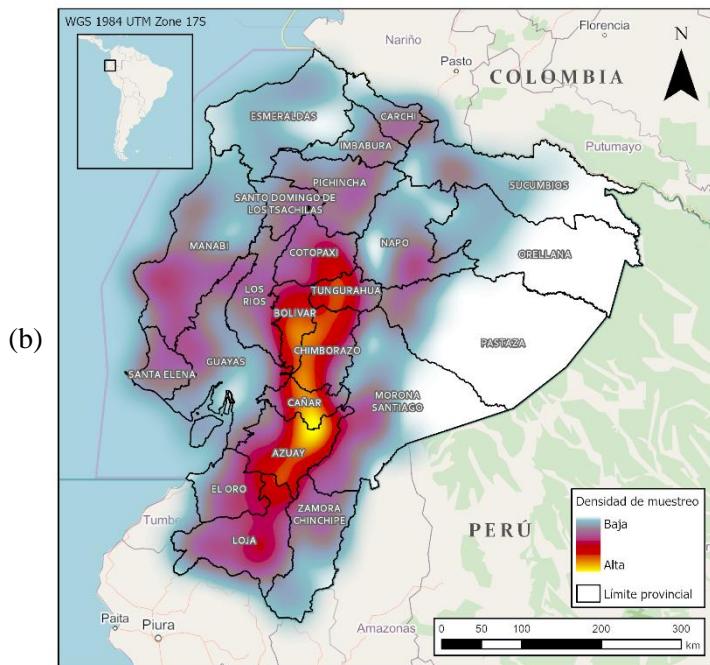


Figura 4. (a) Distribución espacial y (b) Mapa de calor de los perfiles de suelos empleados en el mapeo digital de los suelos

Dado que el levantamiento de suelos se llevó a cabo por horizontes, se obtuvo como resultado una base de datos estratificada a diferentes profundidades, se aplicó una función de interpolación de tipo equal-area-spline [13,14] utilizando el paquete de R "GSIF" [15] para estandarizar los datos a una profundidad de mapeo de 0-30 cm. Esta profundidad fue establecida debido a que en esta zona tienen lugar las principales interacciones suelo-planta y la utilizada para el manejo de fertilidad de los suelos para la mayoría de los cultivos. Además, esta es la profundidad para mapear la capa superficial del suelo utilizada por la Alianza Mundial por el Suelo-FAO permitiendo comparabilidad con otros mapas a nivel regional y global. Las diferentes propiedades del suelo a mapear, fueron caracterizadas a partir de un análisis de estadísticas descriptivas y diagramas de caja empleando el software estadístico R [16].

3.3.2. Covariables ambientales

Un set de 48 covariables ambientales (Tabla 1) fueron colectadas, procesadas y estandarizadas a una resolución espacial de 30 metros y un mismo sistema proyectado de coordenadas (WGS84 – UTM 17Sur). La búsqueda de las covariables se realizó siguiendo la teoría de formación de los suelos descrita por [17] y define que el estado de desarrollo de un suelo es función del relieve, el clima, los organismos, el material parental y el tiempo.

Los atributos del terreno, relacionados al relieve, fueron derivados del Modelo Digital de Elevación (DEM) global ASTER en su versión 3 [18] a una resolución espacial de 30m empleando el paquete de R “RSAGA” [19]. La obtención de estos atributos se realizó

empleando como límite el buffer (3 km) de las cuencas hidrográficas del país, con la finalidad de conservar las características hidrológicas a lo largo del país. Dentro de las covariables climáticas, la temperatura, precipitación y radiación solar en formato ráster fueron obtenidas a través de WORLDCLIM [20], mientras las superficies de déficit hídrico, régimen de humedad, intensidad de precipitación y temperatura atmosférica fueron estimadas por el MAG a partir de modelos de interpolación espacial utilizando información de una serie de 25 años (1985 – 2009), tanto diarios, mensuales como anuales de todas las estaciones de la zona en estudio, han sido actualizados, en base a los registros originales de anuarios meteorológicos ó en formato digital del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y Dirección General de Aviación Civil (DGAC). Los índices de vegetación fueron obtenidos a través de Google Earth Engine (GEE) a partir de imágenes espectrales SENTINEL-2 entre los períodos del 01.01.2020 y 31.12.2020, mientras el mapa de coberturas fue desarrollado por el MAG, IEE y SENPLADES. El material parental fue representado por las covariables de litología, geología y unidad genética proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y el MAG, mientras la edad corresponde a la época geológica, la cual fue proporcionada por el INAMHI. El mapa de unidad morfológica de suelos, así como la textura, pH y las otras propiedades de suelos previamente desarrolladas por el MAG fueron consideradas dentro de la selección inicial de covariables.

Tabla 1. Tabla de covariables medioambientales colectadas para el modelamiento

Grupo	Nombre	Tipo	Resolución espacial original	Fuente	
Suelos	Profundidad efectiva	Categórica	1:25000	MAG	
	Textura suelos				
	Unidad morfológica				
	Conductividad Eléctrica	Continua	1 km		
	pH				
	Porcentaje Sodio Intercambiable				
	Salinidad del suelo				
Clima	Intensidad de precipitación	Categórica	1:25000	MAG	
	Régimen de humedad de suelos				
	Temperatura atmosférica				
	Uso del suelo				
	Zona de déficit hídrico				
	Zona de evapotranspiración potencial				
	Temperatura máxima	Continua	1 km	WORLDCLIM	
	Temperatura mínima				
	Precipitación anual				
	Radiación solar				
Organismos	Cobertura vegetal	Categórica	1:25000	MAG, IEE, SENPLADES	
	BSI (Índice de suelo desnudo)	Continua	10 m	SENTINEL-2	
	GRVI (Índice de vegetación verde-rojo)				

Grupo	Nombre	Tipo	Resolución espacial original	Fuente
	MSI (Índice de estrés por humedad) NBRI (Índice Normalizado de Área Quemada) NDMI (Índice de Humedad de Diferencia Normalizada) NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo)			
	Clases pendiente (%) Curvatura de perfil Curvatura del plano DEM (Modelo digital de Elevación) Distancia al canal Factor LS (longitud-pendiente) Formas del relieve Índice de convergencia Índice de humedad SAGA MRRTF (Multi-resolution ridge top flatness) MRVBF (Multi-resolution valley bottom flatness) Nivel base del canal Pendiente Profundidad del valle RSP (Posición relativa de la pendiente) TPI (Índice de posición topográfica) Zona de captación	Categórica Continua	30 m 30 m	ASTER V3 ASTER V3
Relieve				
Material parental	Litología Geología Unidad genética	Categórica	1:25000	INAMHI MAG
Edad	Época geológica	Categórica	1:25000	INAMHI

3.4. Mapeo de las propiedades del suelo

3.4.1. Selección de covariables

En la ejecución de modelos de predicción, la selección de covariables juega un papel muy importante [21]. Tanto en análisis estadísticos como de predicción, la eliminación de variables irrelevantes, redundantes, y poco importantes o la determinación de un set de covariables suficiente para la predicción es un trabajo necesario para simplificar los problemas estadísticos, apoyar la interpretación, y acelerar los tiempos de procesamiento [22]. En este proceso de

mapeo, dos métodos de selección de covariables fueron empleados de manera independiente para cada propiedad.

El primero de ellos es basado en el algoritmo VSURF (Variable Selection Using Random Forest) [22]. VSURF es un método de selección de covariables basado en Random Forest (RF) [23], el cual analiza la relación de las covariables con la propiedad a predecir y retorna dos subconjuntos de variables. El primero es un subconjunto de variables importantes que incluyen alguna redundancia que puede ser relevante para la interpretación, y el segundo es un subconjunto más pequeño que corresponde a un modelo que intenta evitar la redundancia centrándose, principalmente, en el objetivo de predicción. En este método se seleccionó como set de covariables, el listado con menor número de covariables sugerido para cada propiedad sin hacer énfasis en el tipo de covariables seleccionadas.

En el segundo método, basado en un soporte científico (citado aquí como análisis experto), se realizó un ajuste a los listados anteriores de covariables (VSURF), eliminando aquellas variables que con base en la teoría de formación de suelos no se consideran artificiales en la formación o distribución espacial de cada propiedad. Asimismo, se agregaron aquellas covariables que se consideraban relevantes y que no habían sido consideradas por el algoritmo VSURF. En este método también se retiraron aquellas covariables que debido a su método de digitalización o naturaleza numérica generaban superficies de predicción anómalas (artefactos).

3.4.2. Predicción espacial

Las propiedades fisicoquímicas del suelo en Ecuador fueron estimadas espacialmente empleando mapeo digital de suelos (MDS), el cual es un sistema de modelado basado en computadora, que relaciona la información del suelo en ubicaciones específicas con sus respectivas covariables ambientales, a través de enfoques numéricos, para predecir la información espacial de los suelos [5]. Los productos de MDS representan estimaciones de las propiedades del suelo distribuidas espacialmente en áreas no observadas [24].

En este estudio, se aplicó el algoritmo Random Forest (RF) como enfoque de MDS para predecir las propiedades fisicoquímicas de los suelos del Ecuador continental. RF es un método de aprendizaje automático que consiste en predecir variables a partir de una gran colección de árboles de decisión no correlacionados [23], que se crean a partir de relaciones espaciales entre la variable a mapear y las covariables ambientales. La construcción de cada árbol depende de la clasificación de las covariables ambientales del conjunto de datos de entrenamiento.

El modelo de RF para cada propiedad se ejecutó usando el paquete de R de “Random Forest” (mtry: 2, 4 y 6 y entre: 500) [25], a través de una validación cruzada con 10 iteraciones [26] empleando dos sets de covariables (ver sección 3.4.1). En la validación cruzada se crearon 10 diferentes sets aleatorios de datos con una proporción de 75% para el entrenamiento y 25% para la validación del modelo. Es de resaltar que los sitios seleccionados para el entrenamiento de los modelos en cada iteración se conservaron para cada propiedad. La validación de los modelos

se realizó en función del error cuadrático medio (RMSE) y el error medio absoluto (MAE), seleccionando aquel modelo con el menor RMSE y menor MAE, lo cual indica un mejor desempeño.

Adicionalmente se llevó a cabo un análisis de importancia, el cual es de gran utilidad en los procesos de predicción espacial, ya que permiten comprender como cada covariable contribuye a explicar la variación espacial de la variable predicha. En este estudio, se ejecutó el análisis de importancia en cada proceso de predicción usando el paquete “RandomForest” de R [25]. El análisis de importancia compara el error cuadrático medio de una predicción incluyendo todas las covariables, con el error cuadrático medio al ser excluida una covariable [27]. Las variables más importantes se definieron como aquellas que resultaron en una reducción significativa del poder predictivo cuando se eliminaron del modelo [28].

3.4.3. Evaluación de la incertidumbre

La evaluación de la incertidumbre es un proceso de gran importancia dentro de los estudios de mapeo digital de suelos, ya que revela donde los modelos pueden ser mejorados mediante la optimización del diseño de muestreo [24,29]. En este estudio evaluamos la incertidumbre de las predicciones de los mapas de propiedades de suelos empleando Quantile Regression Forests (QRF). QRF es una extensión de RF introducida por [30], el cual provee un análisis de predicciones medias no paramétricas y un análisis de cuantiles de predicción, lo que permite obtener predicciones espaciales de la incertidumbre del modelo. Esto se logra al proporcionar información de la distribución condicional completa de la variable de respuesta, y no solo sobre la media condicional [29].

La incertidumbre total en este estudio fue expresada como la relación en porcentaje entre la incertidumbre general y la predicción media de cada propiedad del suelo correspondiente [31]. La incertidumbre general es expresada como la sumatoria de la sensibilidad y la incertidumbre del modelo. Donde la sensibilidad es la dispersión (desviación estándar) de diferentes modelos creados a partir de una validación cruzada (en este caso 10) con el 25% de los datos como entrenamiento. La incertidumbre del modelo, así como la media de las diferentes predicciones se calculó empleando el paquete de “quantregForest” de R con la totalidad de los datos [32].

3.5. Mapa de fertilidad química

Siguiendo la metodología empleada por Sánchez-Ortega (1996) [33], se realizó la clasificación y asignación de puntajes a las propiedades químicas de los suelos según los rangos de interpretación descritos por el IGAC (2021) e INIAP (2006) [34,35] (Tabla 2). La materia orgánica fue clasificada de manera independiente para cada piso térmico (caliente, templado y frío), mientras que a la conductividad eléctrica se asignaron valores negativos, debido a que la presencia de altos niveles de esta propiedad repercute negativamente en el estado de fertilidad de los suelos [36].

Una vez clasificadas las propiedades químicas de los suelos, se realizó una sumatoria ponderada:

$$F_T = K \cdot \sum F_i$$

donde, F_T es el índice de fertilidad total, F_i hace referencia a cada propiedad química clasificada (numéricamente) según los rangos de interpretación y K es el factor de conversión que consta de estandarizar la sumatoria a una escala de 0-10, dividiendo 10 entre el máximo puntaje posible a obtener dentro de una misma categoría (en este caso la categoría “Muy alta” = 30).

Finalmente, el mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental se obtuvo al reclasificar el índice de fertilidad total obtenido anteriormente usando la siguiente clasificación: Muy alta: > 8.4, Alta: 8.4 – 6.8, Media: 6.7 – 5.2, Baja: 5.1 – 3.6, Muy baja: < 3.6 [34]. Adicionalmente se añadió una máscara para aquellas áreas donde hay presencia de cangahuas y suelos salinos, de la siguiente manera: fertilidad baja = cangahua en profundidad o conductividad eléctrica (CEAQ) >4.0 a < 8.0 dS/m, y fertilidad muy baja = cangahuas aflorantes o CEAQ >8.0 dS/m (ver sección 4.5).

Tabla 2. Rangos de interpretación para clasificación y asignación de puntajes a las propiedades químicas de los suelos

			Rangos de interpretación				
Propiedad		Característica	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
MO (%)	Clima frío (>2000 m.s.n.m.)	Rango	< 2.2	2.2 - 4.5 > 17.2	4.5 - 6.9 13.8 - 17.2	6.9 - 9 11.2 - 13.8	9 - 11.2
	Clima templado (1000-2000 m.s.n.m.)		< 0.9	0.9 - 2.9 > 13.1	2.9 - 5 11.2 - 13.1	5 - 7.1 9.1 - 11.2	7.1 - 9.1
	Clima cálido (0-1000 m.s.n.m.)		< 0.3	0.3 - 0.9	0.9 - 2.9	2.9 - 5.2	> 5.2
pHAQ (un)		Puntaje	1	2	3	4	5
KDIS (cmol/kg)		Rango	< 4.5 > 8.5	4.5 - 5.0 > 7.8 - 8.5	> 5.0 - 5.5 > 7.3 - 7.8	> 5.5 - 6.0	> 6.0 - 7.3
		Puntaje	1	2	3	4	5
PDIS (mg/kg)		Rango	< 0.1	0.1 - 0.2	> 0.2 - 0.3	> 0.3 - 0.4	> 0.4
		Puntaje	1	2	3	4	5
CIC (cmol/kg)		Rango	< 10	10 - 20	> 20 - 30	> 30 - 40	> 40
		Puntaje	1	2	3	4	5

		Rangos de interpretación						
Propiedad		Característica	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	
Bases intercambiables	SBCC (cmol/kg)	Rango	< 4.0	4.0 - 8.0	> 8.0 – 12.0	> 12.0 - 16.0	> 16.0	
		Puntaje	0.5	1	1.5	2	2.5	
	SatCC (%)	Rango	< 10.0	10.0 - 35.0	> 35.0 – 50.0	> 50.0 - 70.0	> 70.0	
		Puntaje	0.5	1	1.5	2	2.5	
Propiedad		Característica	Extremadamente salino	Altamente salino	Mediana mente salino	Ligeramente salino	No salino	
CEAQ (dS/m)		Rango	> 16	16 - 8	8 - 4	4 - 2	< 2	
		Puntaje	-3	-2	-1	0	0	

MO: Materia orgánica; pHAQ: pH; KDIS: Potasio disponible; PDIS: Fósforo disponible; CIC: capacidad de intercambio catiónico; SBCC: suma de bases; SatCC: saturación de bases; CEAQ: conductibilidad eléctrica; m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar. Fuente: [34,35]

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Estadísticas descriptivas de los datos de campo

El análisis estadístico de los datos de campo empleados para el mapeo digital de las propiedades del suelo provee indicios importantes sobre la distribución, tendencia o presencia de valores extremos que pueden influenciar en los resultados de las predicciones espaciales. La Tabla 3 resume el número de datos válidos o perfiles de suelo empleados por cada propiedad del suelo y proporciona las estadísticas descriptivas de los datos estandarizados a una profundidad de 0-30 cm (Sección 3.3.1). La variación en el número de datos válidos por propiedad es atribuida a la presencia de perfiles sin datos para una propiedad en específico. Adicionalmente, la Figura 5 proporciona los diagramas de caja para cada propiedad.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas de las propiedades fisicoquímicas de los suelos del Ecuador continental

Propiedad	#Datos válidos	Mínimo	Máximo	Mediana	Media	Desviación estándar	Coeficiente de variación
MO (%)	13090	0.00	53.64	3.58	4.89	4.39	0.90
pHAQ (un)	13303	3.48	9.30	6.42	6.46	0.79	0.12
KDIS (cmol/kg)	13233	0.00	160.00	0.31	0.59	2.99	5.05
PDIS (mg/kg)	13001	0.00	658.09	4.90	13.15	27.50	2.09
CIC (cmol/kg)	13188	0.30	155.60	17.00	19.81	13.12	0.66
SBCC (cmol/kg)	13152	0.00	108.37	11.12	15.04	13.35	0.89
SatCC (%)	13179	0.00	642.86	79.75	72.92	43.66	0.60
CEAQ (dS/m)	13263	0.00	141.65	0.12	0.26	1.59	6.05
Arcilla (%)	13290	0.12	93.30	24.35	27.16	14.39	0.53
Arena (%)	13288	0.21	98.38	41.49	42.32	16.42	0.39

MO: Materia orgánica; pHAQ: pH; KDIS: Potasio disponible; PDIS: Fósforo disponible; CIC: capacidad de intercambio catiónico; SBCC: suma de bases; SatCC: saturación de bases; CEAQ: conductibilidad eléctrica.

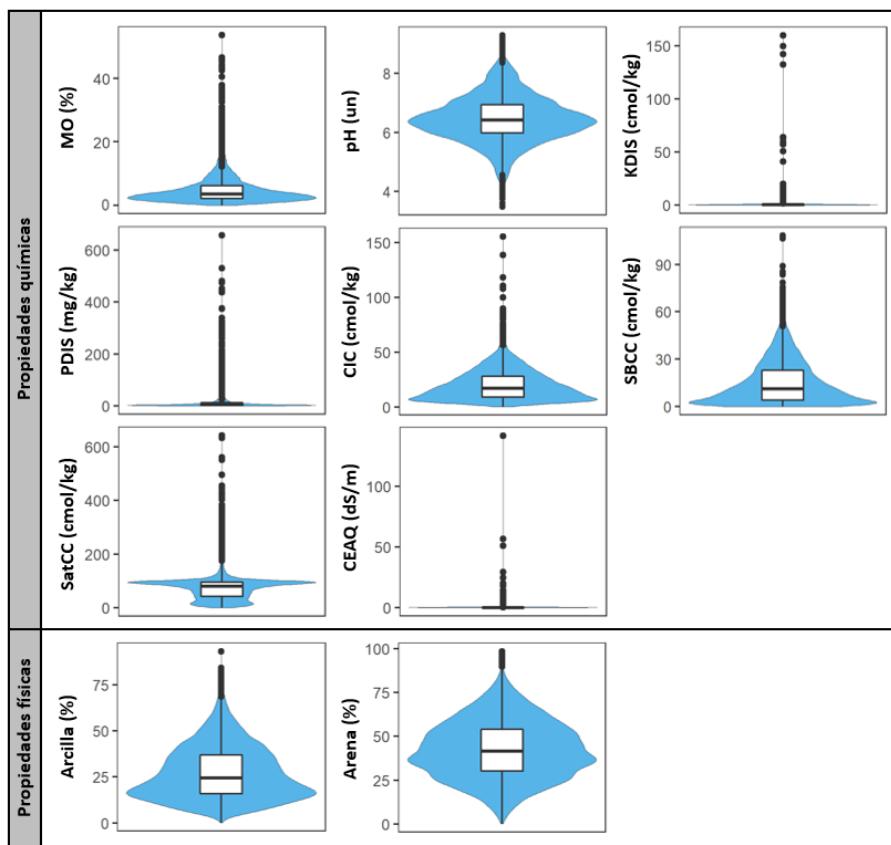


Figura 5. Diagramas de caja de los valores de las propiedades del suelo

La Tabla 3 y Figura 5 muestran que las propiedades de los suelos tienen una alta variabilidad, reflejo de la gran diversidad de condiciones en las cuales se han desarrollado los suelos del país.

Además, las propiedades químicas del suelo también conocidas como dinámicas son afectadas por el manejo y uso del suelo, lo que aumenta la variabilidad espacial. Las propiedades con una mayor variabilidad son la conductividad eléctrica, el potasio y fósforo disponibles, las cuales tienen valores extremos superiores muy distantes respecto a la media. Los valores más altos de fósforo y potasio fueron encontrados principalmente en áreas de producción agrícola, donde la aplicación de fertilizantes es un común denominador y la posibilidad de muestrear suelos recién fertilizados es alta. Por su parte, la presencia de valores extremos en la conductividad eléctrica es atribuida al muestreo de regiones salineras, las cuales están ubicadas al oeste del país. Al contrario de estas propiedades, el pH, arena y arcilla se muestran de manera más uniforme. A pesar de que sus valores mínimos y máximos varían considerablemente de extremo a extremo, sus coeficientes de variación son más bajos, mostrando una dispersión menor de sus valores respecto a la media. Similar comportamiento tiene la CIC, suma y saturación de bases, pero con una variabilidad mayor. La materia orgánica, por su parte, tiene una alta variabilidad, producto principalmente de la diversidad de sitios y ecosistemas en los cuales se realizó el muestreo.

4.2. Resultados de la modelación

Una vez analizados los diferentes modelos ejecutados para cada propiedad, se seleccionaron aquellos con mejor desempeño (menor RMSE y menor MAE) y se evaluó su incertidumbre empleando el mismo set de covariables utilizadas en la modelación espacial. En la Tabla 4, se listan las métricas de desempeño de los modelos seleccionados, así como las principales estadísticas descriptivas de los mapas. En la sección 4.3 se presentan los mapas correspondientes a las predicciones espaciales e incertidumbres para cada propiedad.

Tabla 4. Tabla de estadísticas descriptivas y resultados del modelo

Propiedad	Método selección covariables	Estadísticas descriptivas mapa				Resultados de la modelación		
		Mín.	Máx.	Media	Desviación estándar	RMSE	MAE	RMSEn
MO (g/kg)	VSURF	0.3	32.60	5.40	3.59	0.31	0.19	6%
pHAQ (un)	Análisis experto	4.2	8.60	6.06	0.61	0.55	0.42	8%
KDIS (cmol/kg)	Análisis experto	0.08	92.38	0.51	0.99	2.46	0.45	416%
PDIS (mg/kg)	VSURF	0.6	326.70	10.40	7.25	24.65	11.36	187%
CIC (cmol/kg)	Análisis experto	3.1	99.40	20.11	9.18	8.21	6.02	41%
SBCC (cmol/kg)	Análisis experto	0.89	73.59	11.39	9.58	8.32	5.97	55%
SatCC (%)	Análisis experto	2.5	419.10	53.18	27.43	32.61	20.67	45%
CEAQ (dS/m)	VSURF	0.04	68.40	0.26	0.83	1.19	0.20	452%
Arena (%)	VSURF	3	83.00	34.46	13.16	9.40	6.88	22%
Arcilla (%)	VSURF	3	71.00	27.76	11.98	7.25	5.13	27%

MO: Materia orgánica; pHAQ: pH; KDIS: Potasio disponible; PDIS: Fósforo disponible; CIC: capacidad de intercambio catiónico; SBCC: suma de bases; SatCC: saturación de bases; CEAQ: conductibilidad eléctrica. Mín.: mínimo; Máx.: máximo; VSURF: Variable Selection Using Random Forests, RMSE: Error cuadrático medio, MAE: Error medio absoluto, y RMSEn: RMSE normalizado por el valor medio de los datos observados.

Los resultados anteriores muestran que las propiedades con mejor desempeño (en orden descendente según su RMSEn) son la MO, el pHAQ, la arena y la arcilla, mientras propiedades como PDIS, KDIS y CEAQ presentan las métricas de validación menos satisfactorias. Se evidenció que las covariables y métodos de selección, así como el extenso set de datos de campo empleados para las predicciones fueron los más acertados. Sin embargo, el potencial de predicción de las propiedades con menor desempeño puede ser explicado principalmente a la presencia de covariables no lo suficientemente explicativas de su distribución espacial y a la distribución de los datos de campo. Especialmente, para estas propiedades se evidenció una alta dispersión de los datos de campo (Sección 4.1) con una gran presencia de valores muy extremos respecto a la media, que crean un efecto de subestimación de los valores extremos,

especialmente para aquellas regiones de similares condiciones donde coexisten tanto valores muy bajos como muy altos, aumentando así los errores de predicción. Estas predicciones pueden ser mejoradas a futuro, incrementando los sitios de muestreo, especialmente en áreas con características similares a los sitios con valores extremos y ampliados hacia áreas como la Amazonía y otras sin presencia de puntos de campo. Asimismo, se recomienda explorar y agregar nuevas covariables a los modelos que permitan explicar su variabilidad, la cual para el caso de KDIS y PDIS es influyente principalmente por el manejo de los suelos y aplicación de planes de fertilización. Cabe resaltar que los valores máximos (que tienden a ser pocos) son aquellos que presentan una mayor reducción en sus predicciones.

Adicionalmente, no se evidenció un efecto diferencial preferente en ninguno de los métodos de selección de covariables. Ambos métodos mostraron ser efectivos en la predicción de propiedades del suelo. El método basado en el análisis experto demostró que las modificaciones realizadas a los sets de covariables a partir del VSURF tuvieron resultados positivos en los casos en los que se aplicó. Esto indica que el proceso de selección de covariables en procedimientos de MDS puede ser satisfactoriamente apoyado por el conocimiento de un experto. Los grupos de covariables más empleadas en la predicción espacial de las propiedades fisicoquímicas de los suelos del Ecuador continental se presentan en la Figura 6. El grosor de las líneas representa la magnitud de importancia del grupo en la predicción de cada propiedad. Líneas más gruesas, representan una mayor relevancia.

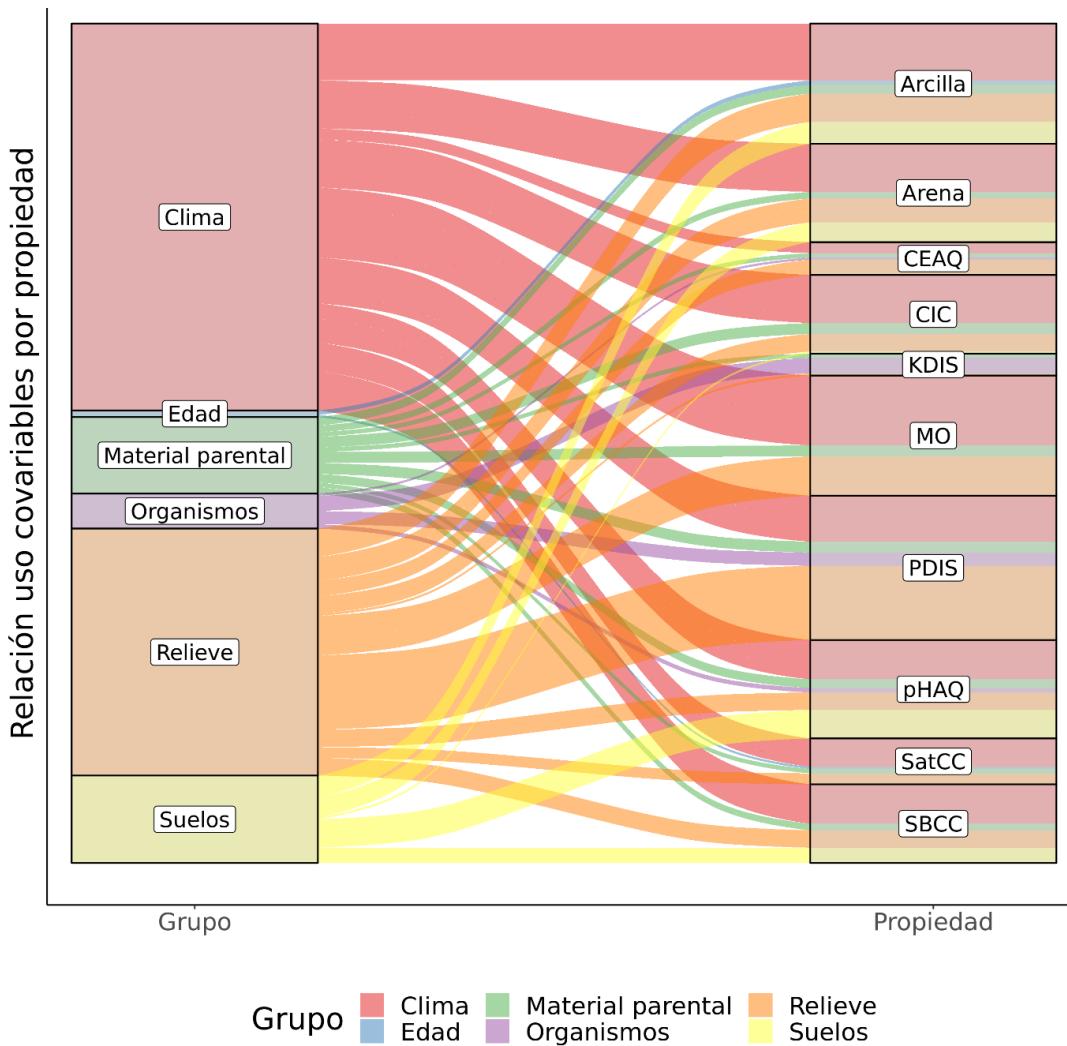


Figura 6. Covariables más empleadas en la predicción espacial de las propiedades fisicoquímicas de los suelos del Ecuador

En general, se observa que las covariables atribuidas al clima y el relieve son las más usadas en la predicción de las propiedades fisicoquímicas de los suelos, seguido por el grupo de material parental, suelos, organismos y en última posición la edad. En la gráfica anterior, se observa que el grupo de covariables pertenecientes al clima, representan la mayor proporción de covariables empleadas en todas las propiedades, a excepción de PDIS, en la cual el grupo de covariables del relieve representan el 51.5% de las covariables.

La covariable de uso más frecuente fue el DEM con presencia en la predicción de todas las propiedades fisicoquímicas; seguido por la geología y litología con 7 apariciones cada una, exceptuando su presencia en la CEAQ y KDIS; la precipitación anual, el régimen de humedad de suelos y temperatura mínima con 6; la temperatura máxima, la radiación solar y el nivel base del canal con 5; la textura con 4 y la cobertura vegetal con 3. El listado detallado de las covariables ordenadas según su importancia se lista en la Tabla 5.

Tabla 5. Tabla de importancia de covariables

Orden	MO	pHAQ	KDIS	PDIS	CIC	SBCC	SatCC	CEAQ	Arena	Arcilla
1	DEM	MO	GRVI	DEM	DEM	DEM	Precip. anual	Rad. solar	Textura suelos	Textura suelos
2	T. min	DEM	Cob. vegetal	Nivel base del canal	T. min	T. min	DEM	DEM	T. máx.	T. máx.
3	T. máx.	T. min	Unid. genética	Precip. anual	T. máx.	Déficit hídrico	T. máx.	Nivel base del canal	T. min	T. min
4	Nivel base del canal	Déficit hídrico	DEM	Rad. solar	Precip. anual	Régimen humedad suelos	Régimen humedad suelos	Unidad genética	Nivel base del canal	Nivel base del canal
5	Precip. anual	Régimen humedad suelos	-	MRVBF	Régimen humedad suelos	Cond. Eléctrica	Geología	NDVI	DEM	DEM
6	Régimen humedad suelos	Litología	-	Pendiente	Litología	Porc. Sodio Interc.	Época geológica	-	Precip. anual	Precip. anual
7	Rad. solar	Porc. Sodio Interc.	-	MSI	Geología	Litología	-	-	Rad. solar	Rad. solar
8	Litología	Cob. vegetal	-	Régimen humedad suelos	Textura suelos	Geología	-	-	Litología	Geología
9	Geología	Textura suelos	-	Geología	-	-	-	-	Geología	Época geológica
10	Pendiente	-	-	Litología	-	-	-	-	-	Litología
11	-	-	-	Cob. vegetal	-	-	-	-	-	-

DEM: Modelo Digital de Elevación, T. min: Temperatura mínima, T. máx.: Temperatura máxima, Precip. Anual: Precipitación anual, Rad. solar: Radiación solar, MO: Materia Orgánica; pHAQ: pH; KDIS: Potasio disponible; PDIS: Fosforo disponible; CIC: capacidad de intercambio catiónico; SBCC: suma de bases; SatCC: saturación de bases; CEAQ: conductibilidad eléctrica, Cob. Vegetal: Cobertura vegetal, GRVI: Índice de vegetación verde-rojo, MRVBF: Multi-resolution valley bottom flatness, MSI: Índice de estrés por humedad, Déf. Hídrico: Déficit hídrico, Cond. Eléctrica: Conductividad eléctrica, NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada.

4.3. Distribución espacial e incertidumbre de las propiedades del suelo

En cuanto a las predicciones espaciales de las propiedades fisicoquímicas, se observa que la región de la Costa tiene los valores predichos promedio más altos para pHAQ (6.5), KDIS (1.01 cmol/kg), PDIS (13.6 mg/kg), CIC (28.5 cmol/kg), SBCC (22 cmol/kg), SatCC (76.1 %), CEAQ (0.6 dS/m), lo cual representa una mejor disponibilidad de nutrientes, contrario a la región Amazónica que posee los valores promedio más bajos (pHAQ: 5.7, KDIS: 0.3 cmol/kg, PDIS: 7.8 mg/kg, CIC: 16.5 cmol/kg, SBCC: 5.5 cmol/kg, SatCC: 35.5 %, CEAQ: 0.1 dS/m). La Sierra posee los valores promedio más altos para arena (44%), mientras el Amazonia tiene los valores promedios más altos de arcilla (32%). La región con menor valor promedio de MO es la Sierra (7.1 %), seguido por la Amazonia (5.7 %) y en último lugar la Costa (3.2 %).

En cuanto a la incertidumbre, se observa que los valores promedio a nivel nacional de la mayoría de las propiedades fisicoquímicas del suelo mostraron niveles razonables de precisión, variando principalmente entre el 10% y el 75% (color verde claro): pHAQ (13.4%), Arena (40.8%), Arcilla (44.7%), SBCC (51.5%), CIC (63.4%), MO (68.1%). Las propiedades que presentaron menor precisión (valores promedio mayores a 100%) son la de CEAQ (132.5%), KDIS (162.7%), PDIS (205.9%). En comparación, la región con menor incertidumbre promedio para la mayoría de las propiedades (a excepción de pHAQ, KDIS, CEAQ y arena) fue la Costa. La Amazonía por su parte fue la región con las incertidumbres más elevadas, teniendo las incertidumbres promedio más altas (entre las regiones) para cinco de las diez propiedades.

Una alta incertidumbre espacial es producto principalmente de la falta de sitios de muestreo, una alta heterogeneidad de los datos de campo en condiciones ambientales similares o también la falta de poder predictivo o detalle de las covariables empleadas. En estos casos se requiere aumentar la cantidad de sitios de muestreo dando prevalencia a estas zonas y asimismo analizar la calidad e inclusión de nuevas covariables al modelo, en especial aquellas de difícil acceso como lo son las relacionadas a las prácticas de manejo. Con estas acciones se espera mejorar la precisión espacial de los modelos. Asimismo, es de notar que la incertidumbre debe ser analizada de acuerdo con el valor promedio predicho por el modelo, ya que un valor de incertidumbre de 100% difiere si se refiere a un valor predicho de materia orgánica de 4% como en la región de la Amazonía o a un valor de 0.5% en la Sierra.

A continuación, se presentan individualmente las predicciones espaciales para las propiedades fisicoquímicas de los suelos del Ecuador continental y su correspondiente incertidumbre.

4.3.1. Materia orgánica

La materia orgánica del suelo (MO) es el componente orgánico de los suelos y consiste en todo material de origen animal o vegetal en diferentes estados de desintegración y descomposición. La MO es necesaria en todas las funciones del suelo y es el indicador más importante de la salud de este. Funciona como un reservorio de nutrientes, mejora la agregación y porosidad del suelo, la capacidad de retención de agua, amortigua los efectos de una alta acidez, aumenta el pH y el intercambio de cationes, reduce la compactación, proporciona alimento a los microorganismos, y actúa como un sumidero o fuente de carbono [37,38]. El contenido de MO se ve afectado por la erosión, las quemas, la sobreexplotación agrícola y por la constante acumulación de biomasa. De allí su importancia y necesidad en conservación y mejoramiento mediante prácticas adecuadas de manejo [39].

Los factores ambientales que afectan principalmente la tasa de descomposición de la MO son el clima, la mineralogía de los suelos, el uso y prácticas de manejo. En climas cálidos y húmedos la MO se descompone a mayor velocidad y en climas fríos y secos a una velocidad menor. Asimismo, su tasa de descomposición es mayor en suelos bien aireados que en aquellos

saturados [37]. En la Figura 7a, se observa que la MO posee un gradiente de variación en función principalmente de la topografía y la temperatura (principales covariables de predicción, Tabla 5). Otras covariables de gran importancia empleadas en la predicción de la MO fueron las relacionadas al material parental (litología y geología).

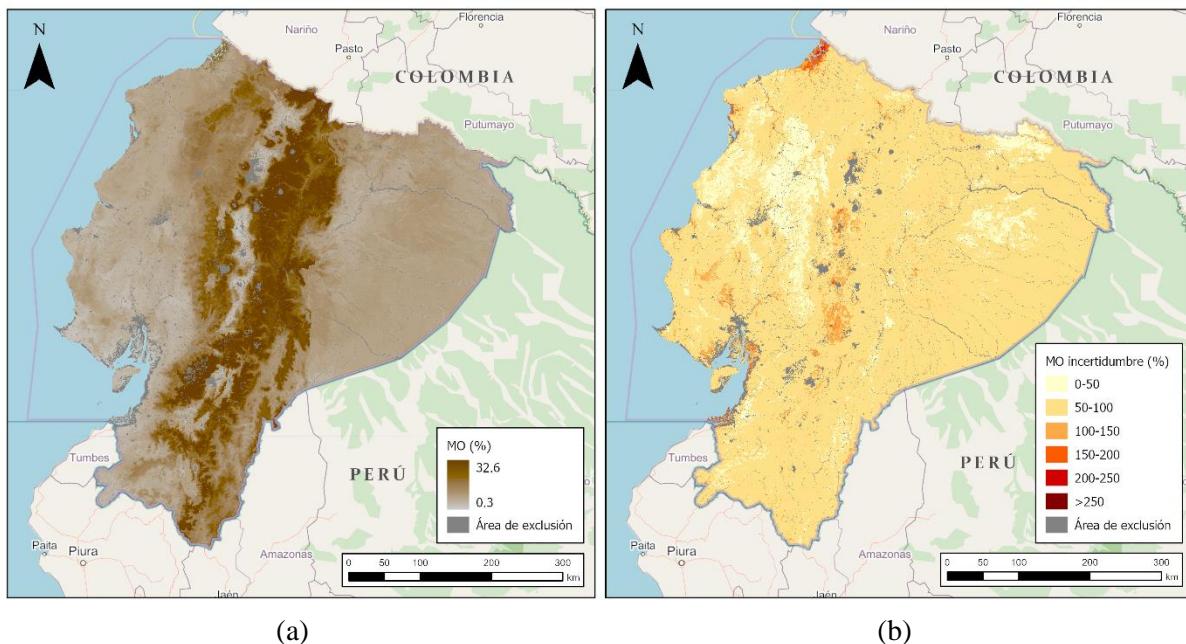


Figura 7. (a) Mapa de predicción de la Materia orgánica (MO) y (b) Mapa de incertidumbre

Los valores promedio más altos se registraron en la región de la Sierra (7.1%) en la cual según la clasificación taxonómica predominan los Andisoles (Figura 3), seguido por los suelos de la Amazonía (5.7%) y en último lugar los suelos de la Costa (3.2%), región ampliamente empleada en actividades agropecuarias.

Los valores más altos fueron predichos en áreas de montaña, específicamente en áreas clasificadas como tierras arbustivas y herbáceas (Figura 1b) donde predominan los páramos. Los páramos son ecosistemas tropicales de alta montaña que debido a su alta productividad primaria, bajas temperaturas y bajas tasas de mineralización se acumulan altas cantidades de materia orgánica en los suelos [40,41]. Por el contrario, los valores más bajos fueron predichos en áreas agropecuarias de alta montaña, las cuales se encuentran ubicadas principalmente en planicies en inmediaciones a grandes urbes, las cuales se han caracterizado por una intensiva actividad agrícola [42,43]. En zonas de baja elevación y temperaturas altas como la Costa y Amazonía se predijeron valores bajos de MO. Esto se explica debido a la alta actividad microbiana y altas tasas de mineralización de MO [43]. Los valores más bajos dentro de estas regiones se predijeron en suelos aridisoles ubicados en el oeste del país, donde las precipitaciones son escasas y las temperaturas muy altas, desfavoreciendo la acumulación de materia orgánica en los suelos [44].

Respecto a la incertidumbre (Figura 7b), se observa que la mayoría del territorio presenta una incertidumbre entre el 50% y 100%. Su valor promedio a nivel nacional se ubica alrededor de un 68.1%, siendo las diferencias entre regiones bastante bajas: Sierra: 69%, Costa: 67.1% y Amazonia: 68.3%. Los valores más altos de incertidumbre ($>150\%$) se hallan en la zona norte de la provincia de las Esmeraldas, ubicada en la costa norte del pacífico, mientras que los menores ($<50\%$) se encuentran mayoritariamente en pastizales a lo largo de las provincias de Santo Domingo de los Tsachilas, Bolívar, Manabí, Cotopaxi, Pichincha y Los Ríos.

De acuerdo a la Tabla 2 se clasificó el mapa de MO (Figura 8a), y se generó la gráfica de distribución de clases a nivel nacional (Figura 8b), con lo que se observa que en el país (área continental) el 53.7% de la superficie contiene niveles altos de MO, seguido por el nivel medio con 25%, muy alto con 11.5%, 4.5% con niveles bajos y menos de 1% contienen niveles muy bajos.

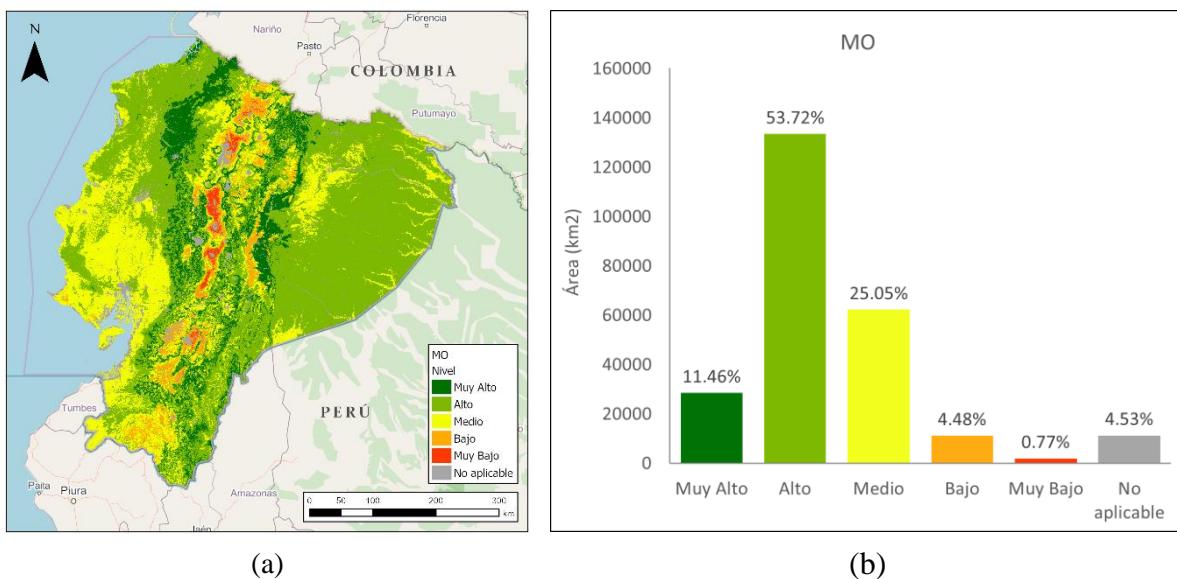


Figura 8. (a) Mapa de Materia orgánica (MO) clasificada y
(b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional

4.3.2. pH

El pH o potencial de hidrógeno es la concentración de iones hidrógeno (H^+) en estado libre presentes en un suelo [45]. El pH indica el nivel de acidez o alcalinidad de un suelo, siendo ácidos aquellos suelos con valores de pH por debajo de 7.0, básicos o alcalinos cuando su valor es mayor a 7.0 y neutros cuando es 7.0 [46]. Este parámetro es considerado un factor importante que influye en los procesos bioquímicos de los suelos, modificando la disponibilidad de sus nutrientes, la actividad microbiana, la movilidad de contaminantes, entre otros [37,47,48]. En suelos con pH alrededor de 6.5, en general, la disponibilidad de los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas es mayor [49], mientras que para suelos extremadamente ácidos ($pH < 5.5$), pueden existir deficiencias de Ca, Mg, Mo y P y peligro por toxicidades de Fe, Al y Mn.

En suelos fuertemente alcalinos (>8.5), se pueden presentar deficiencias de Fe, Zn, Mn, B y P, y toxicidades por salinidad.

El pH del suelo se ve influenciado principalmente por el clima, los minerales del suelo y la textura del mismo [37]. Para el Ecuador continental, el pH fue predicho en función de la materia orgánica (propiedad anteriormente predicha), la elevación, el clima (representado por la temperatura, el déficit hídrico y el régimen de humedad suelos), el material parental (litología, textura de suelos) y el porcentaje de sodio intercambiable.

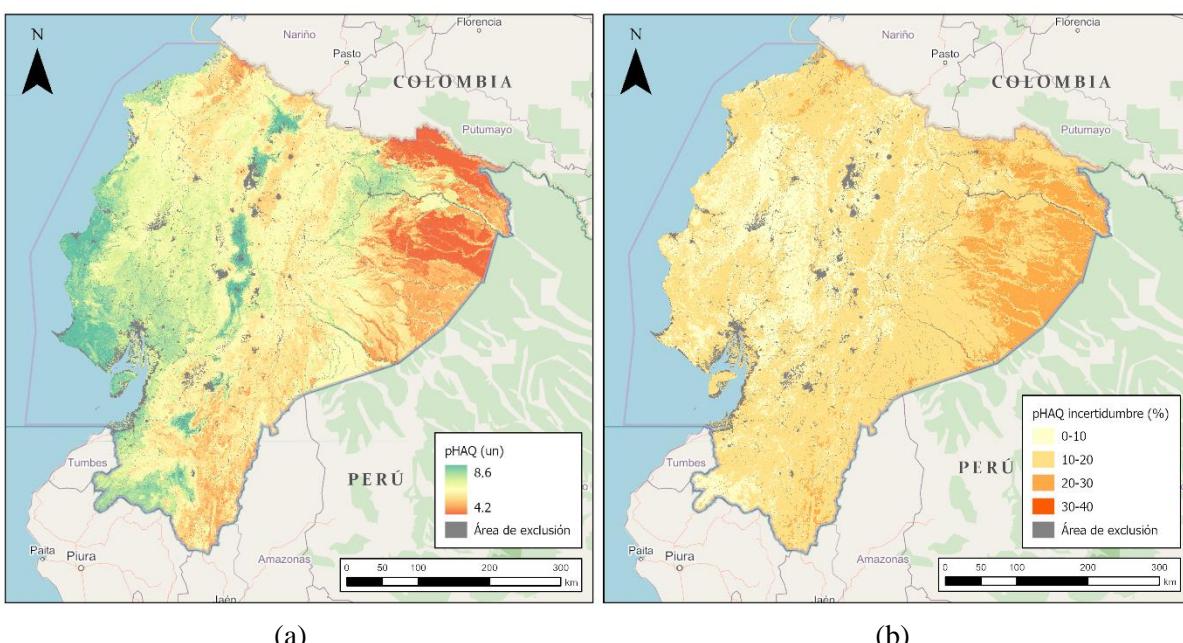


Figura 9. (a) Mapa de predicción del pH (pHAQ) y (b) Mapa de incertidumbre

En la Figura 9a, se observa que en zonas cálidas y húmedas como en la región de la Amazonía, donde existen altas temperaturas y precipitaciones, los suelos son ricos en materiales arcillosos y la intervención humana es casi nula, se presentan los valores más bajos de pH del suelo (valor promedio = 5.7). En ambientes secos como el oeste del país donde la meteorización y la lixiviación son menos intensas, el pH del suelo tiende a ser más neutro o alcalino, principalmente en áreas arbustivas y tierras forestales de cercanía a suelos Aridisoles (ver Figura 2 y 3). Los suelos con pH más alto (neutros a alcalinos) tienden a distribuirse a lo largo de las planicies de la altillanura de los Andes, en las cuales se predijeron los valores más bajos de MO y posiblemente existe un manejo intensivo de los suelos y una aplicación extendida de enmiendas. Adicionalmente se evidencia que los suelos más ácidos de la Amazonía coinciden con la distribución espacial de Ultisoles, suelos caracterizados por su alto grado de evolución y baja fertilidad natural (Figura 3). Los valores promedio de pH para las regiones geográficas son: Amazonia = 5.7, Sierra = 6.3 y Costa = 6.5, respectivamente.

En cuanto a la incertidumbre Figura 9b, presenta valores inferiores al 20% en casi todo el territorio (valor promedio nacional = 13.4%). Esto ocurre debido a la homogeneidad de los datos de campo, y al poder explicativo de las covariables empleadas en el modelamiento. Las incertidumbres más altas (>20%) se identifican en la zona este de la Amazonía, región en la cual el muestreo es escaso. Su valor promedio se ubica alrededor de un 15.9%, mientras que las regiones de las Costa y la Sierra tienen valores más bajos (11.2% y 10.9%).

Según la Tabla 2 se clasificó el mapa de pH (Figura 10a), y se generó la gráfica de distribución de las clases a nivel nacional (Figura 10b). Allí se presenta que el 45.4% de la superficie contiene niveles entre 6.0 y 7.3, interpretados como Muy alto para fertilidad, seguido por el nivel Alto (5.5 – 6.0) con 31%, Medio (5.0-5.5; 7.3-7.8) con 13.6%, Bajo (4.5-5.0; 7.8-8.5) con 4.1% y finalmente Muy bajo (<4.5; >8.5) con 1.4%.

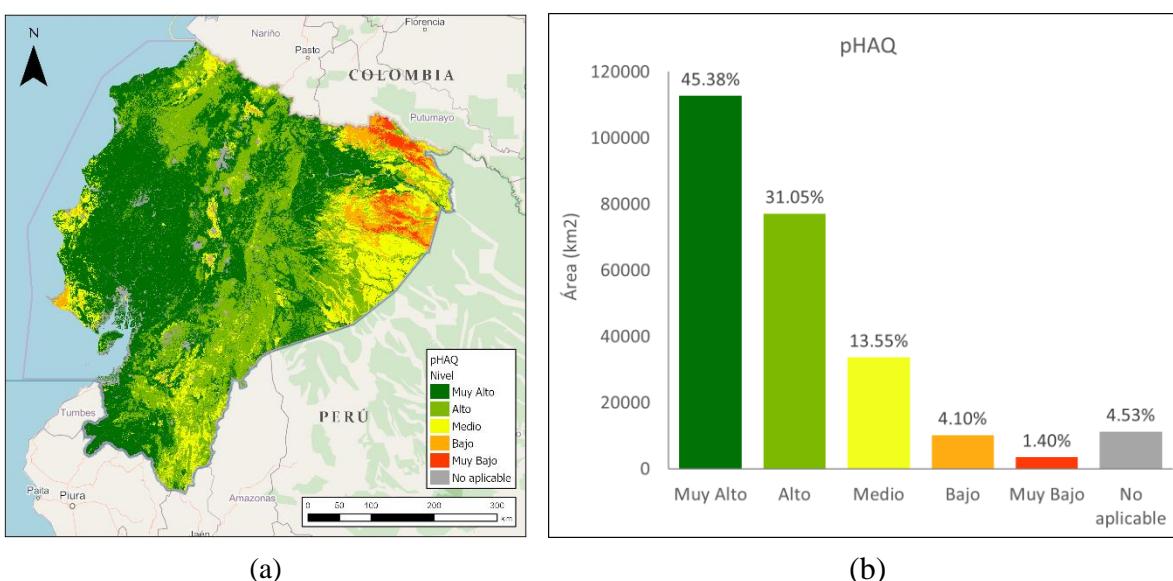


Figura 10. (a) Mapa de pH (pHAQ) clasificado y
(b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional.

4.3.3. Potasio disponible

El potasio al igual que el fósforo y nitrógeno, es uno de los elementos esenciales en la nutrición de las plantas. Cumple un papel importante en la activación de más de 60 enzimas que actúan en diferentes procesos metabólicos de las plantas. Este nutriente influye directamente en el proceso de fotosíntesis, en el transporte y translocación de nitratos y carbohidratos, en la síntesis de proteínas, el balance de agua, la apertura y cierre de los estomas, el crecimiento meristemático, la fructificación, maduración y calidad de los frutos [50,51].

El potasio en el suelo se encuentra en cuatro formas, las cuales difieren en su disponibilidad de potasio para los cultivos. De mayor a menor disponibilidad se encuentra el potasio en solución, el potasio intercambiable, el potasio no intercambiable y el potasio mineral [52]. El potasio disponible, es aquel que se encuentra en el agua del suelo y el que está retenido en los coloides

(intercambiable) y por ende es aquel empleado para realizar los planes de fertilización [49]. Una deficiencia de este elemento provoca la clorosis de los márgenes de las hojas y, en casos graves, la caída de las hojas más viejas.

La disponibilidad del potasio depende en primera medida del tipo de suelo, el material parental, el tipo de vegetación, el clima, y la topografía. Estos factores interactúan mutuamente y afectan la distribución espacial del potasio, el cual es principalmente formado a partir de materiales ricos en arcilla. Asimismo, la humedad de los suelos influye notablemente en su distribución, ya que esta afecta su movimiento y absorción por las plantas [53]. El uso de los suelos influye en el tipo de manejo y aplicación de fertilizantes. Las principales covariables empleadas para su predicción fueron el índice de vegetación verde-rojo (GRVI), la cobertura vegetal, la unidad genética y la elevación.

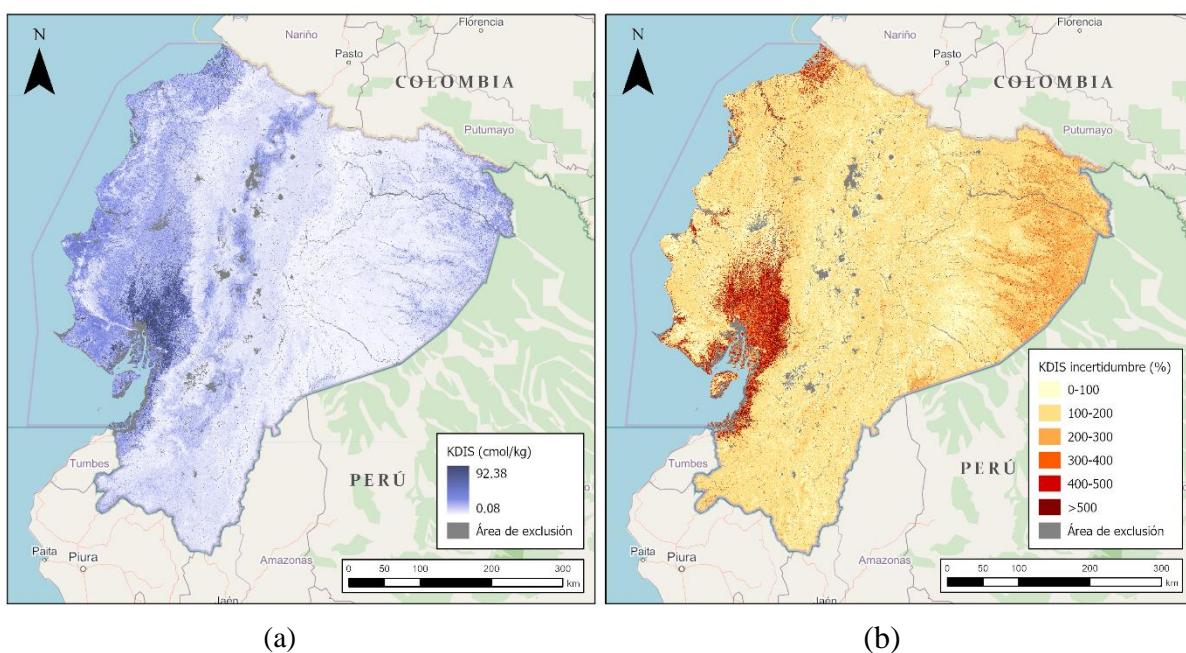


Figura 11. (a) Mapa de predicción del Potasio disponible (KDIS) y (b) Mapa de incertidumbre

En la Figura 11a se observa que el potasio disponible en los suelos del Ecuador en general es bajo. Su valor promedio a nivel nacional se sitúa alrededor de los 0.52 cmol/kg. Sin embargo, se aprecian cuatro tendencias importantes en su distribución a nivel nacional: 1) En la región de la Amazonía se evidencian los valores promedio más bajos del país (0.3 cmol/kg) a excepción de su extremo este y los deltas de los ríos que desembocan hacia la Amazonía, mientras que en la Costa se perciben valores un poco más altos (1.01 cmol/kg) producto posiblemente de una actividad agrícola más conservacionista. Los valores más altos se ubican en inmediaciones de Guayaquil, una región agrícola conocida por su explotación arrocera en la cual el uso constante de fertilizantes ha provocado el aumento de este elemento en los suelos. La Sierra por su parte tiene un valor promedio similar al de la Amazonía (0.4 cmol/kg), pero los valores más altos de esta región se ubican a lo largo de las áreas agrícolas.

La incertidumbre promedio de esta propiedad a nivel nacional (162.7%) es la segunda más alta de las propiedades mapeadas, solamente ubicada por detrás del fósforo disponible. La incertidumbre del KDIS (Figura 11b) en particular presenta valores de hasta 200% en la mayoría del territorio nacional, exceptuando el sector del Este amazónico, en el cual aumenta debido a la falta de muestras de campo. Las incertidumbres más altas (>300%) se ubican en las áreas de mayor concentración o predicción de potasio. En estas áreas se identificó la presencia de datos de campo muy heterogéneos, ubicados en condiciones ambientales muy similares, sin mostrar algún patrón claro de distribución. Esta situación provoca, al igual que en otras propiedades, que en el proceso de predicción se estimen valores muy diversos (tanto altos como bajos) en función del set de datos empleado.

De acuerdo con la Tabla 2, se clasificó el mapa de potasio disponible (KDIS) (Figura 12a). Igualmente se generó la distribución de las clases a nivel nacional (Figura 12b), donde se observa que el 35.8% de la superficie del Ecuador continental presenta regiones interpretadas como Muy alto para fertilidad (>0.4 cmol/kg), seguido por valores Medio (0.2-0.3 cmol/kg) con 25.5%, Bajo (0.1-0.2 cmol/kg) con 18.4%, Alto (0.3-0.4 cmol/kg) y Muy bajo (<0.1 cmol/kg) con 0%.

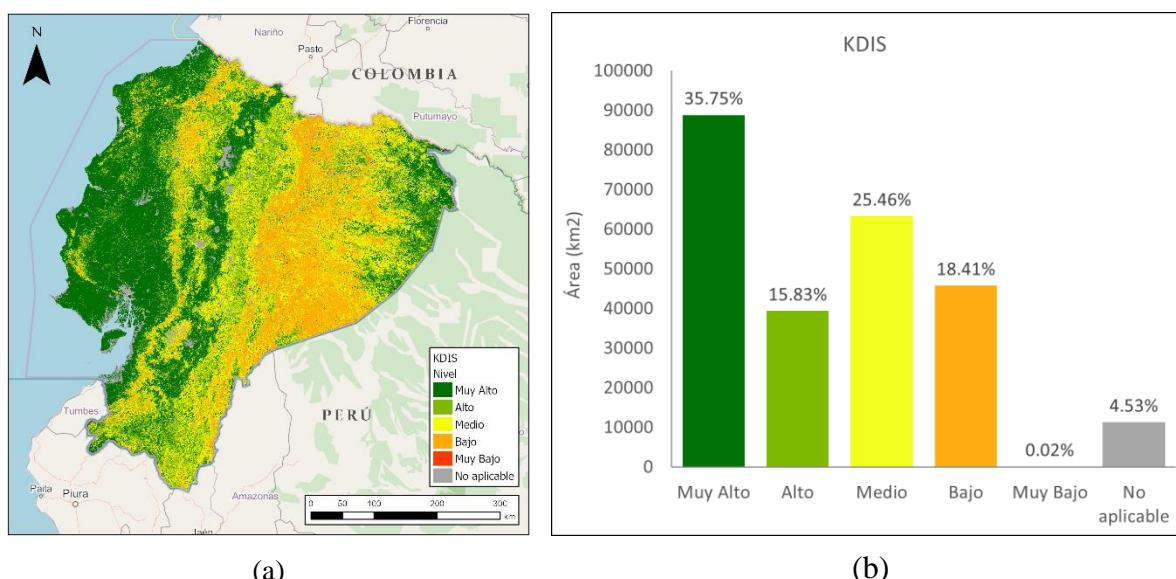


Figura 12. (a) Mapa de Potasio disponible (KDIS) clasificado y
(b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional

4.3.4. Fósforo disponible

El fósforo es uno de los minerales más importantes en la nutrición de las plantas. Su función principal es el almacenamiento y transformación de la energía producida por la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas [37]. El fósforo en niveles adecuados promueve la producción de frutos, flores, raíces y semillas; mejora los procesos microbianos del suelo y aumenta el desarrollo, rendimientos y la reproducción de las plantas. Este elemento en forma soluble puede

perderse en condiciones de excesiva escorrentía superficial, drenaje y lixiviación, por lo cual la implementación de buenas prácticas es necesaria para su adecuado manejo [37,54].

Este elemento bastante demandado por las plantas, suele ser limitado en los suelos y por lo tanto se hace necesario la aplicación de fertilizantes fosfatados [54]. Factores como el clima, la topografía, los organismos, el material parental y otras propiedades de los suelos controlan la distribución de este elemento [37]. Estos factores (en combinación) influyen en la intensidad de meteorización de la roca madre y la mineralización de la materia orgánica, fuentes naturales de fósforo en los suelos; controlan la magnitud de crecimiento de las plantas y la necesidad y solubilización de fertilizantes, así como la distribución de la escorrentía superficial y la erosión [55]. Dichos factores se ven reflejados en la predicción a través de covariables como el DEM, el nivel base del canal, la precipitación anual, la radiación solar, el MRVBF, la pendiente, el MSI, el régimen de humedad del suelo, la geología, la litología y la cobertura vegetal.

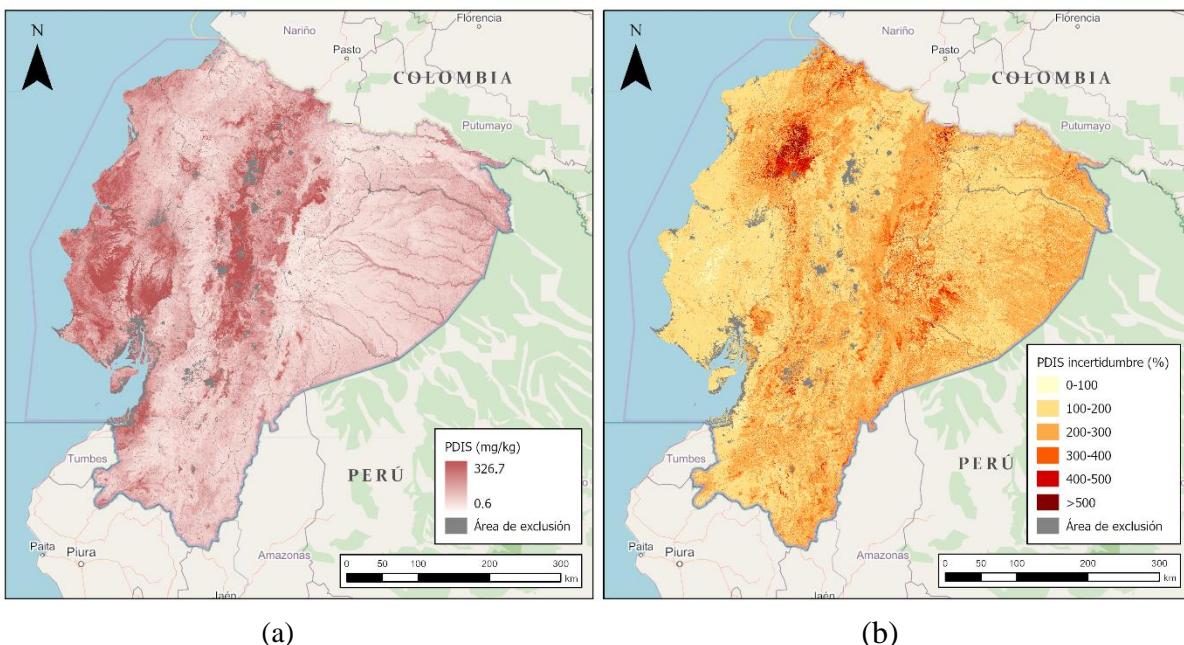


Figura 13. (a) Mapa de predicción del fósforo disponible (PDIS) y (b) Mapa de incertidumbre

En la Figura 13a, se evidencia que los contenidos más altos de fósforo disponible en el Ecuador continental se ubican principalmente en los altiplanos de la Sierra, correspondiendo a aquellas regiones de uso agrícola y en donde la aplicación de fertilizantes es común. Cabe resaltar que, en gran medida, los suelos usados como tierras agropecuarias presentan valores altos de fósforo disponible como es el caso de la región de la Costa. Adicionalmente, se nota que la mayoría del país tiene valores bajos de fósforo disponible, siendo la región de la Amazonía en la cual se presentan los valores más bajos del país, lo cual se relaciona con los altos contenidos de arcilla presentes, los cuales aumentan la fijación de fósforo al suelo [56]. Los valores promedio de

fósforo para las diferentes regiones geográficas son Costa = 13.6 mg/kg, Sierra = 12 mg/kg y Amazonia = 7.8 mg/kg.

En términos generales, el fósforo es la propiedad con la mayor incertidumbre promedio a nivel nacional del set de propiedades mapeadas (205.9%). Su efecto se ve reflejado en que solamente una pequeña porción del territorio tiene incertidumbres menores a 100% (Figura 13b), mientras la mayoría del territorio se encuentra entre 100% y 300%. En la zona norte de la Costa se evidencia un conglomerado de incertidumbre con valores mayores a 400%, lo cual demuestra la necesidad de incrementar el muestreo en aquellas zonas, evitando la toma de muestras en tiempos cercanos a la época de fertilización o con rastros de este. En cuanto a las regiones, la incertidumbre promedio es alta en todas ellas, pero menor en la Costa (179.4%), seguido por la Sierra (213.4%) y en último lugar la Amazonia.

De acuerdo con la Tabla 2, se clasificó el mapa de fósforo disponible (PDIS) (Figura 14a), y se generó la distribución de las clases a nivel nacional (Figura 14b), donde se observa que el 59.1% de la superficie del Ecuador continental presenta regiones interpretadas como Muy bajo para fertilidad (<10 mg/kg), seguido por el valor Bajo (10-20 mg/kg) con 28%, Medio (20-30 mg/kg) con 6.3%, Alto (30-40 mg/kg) con 1.4% y Muy alto (>40 mg/kg) con 0.7%.

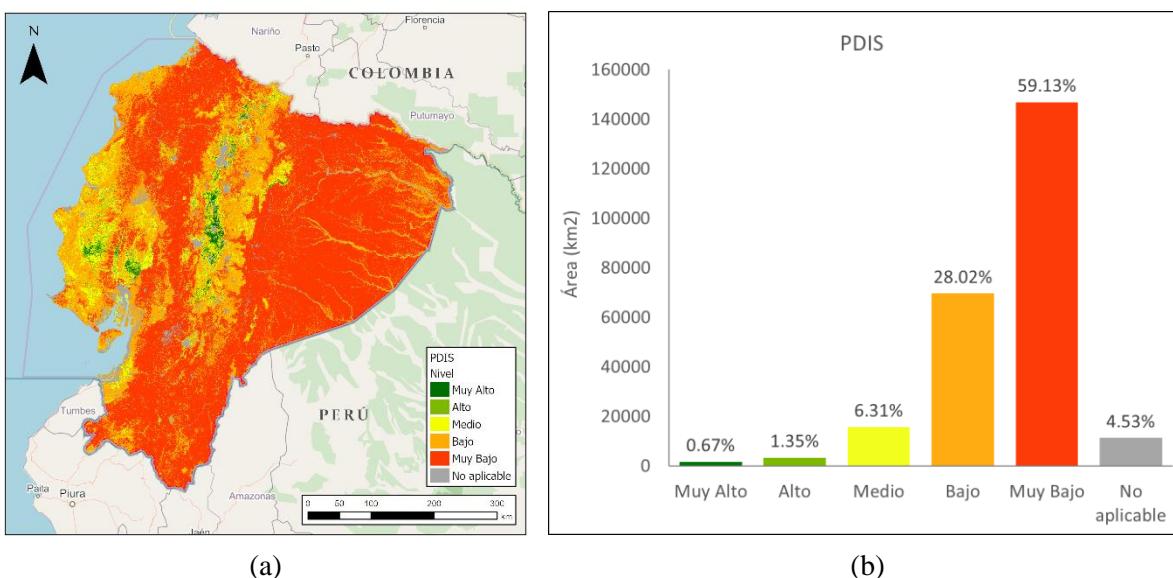


Figura 14. (a) Mapa de fósforo disponible (PDIS) y
(b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional

4.3.5. Capacidad de Intercambio Catiónico

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) mide la cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (minerales de arcilla, óxidos de hierro y aluminio, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la capacidad de un suelo para atraer e intercambiar cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) [46,57].

La CIC controla muchas de las funciones básicas del suelo relacionadas con el pH, disponibilidad de nutrientes y contaminantes, y la retención de agua, siendo un indicador importante de la fertilidad de los suelos [58]. En suelos ricos en arcillas o materia orgánica, estas partículas de carga negativa tienden a atraer a su superficie a los cationes de carga positiva mediante fuerzas electrostáticas, evitando así su perdida por lixiviación [59]. La CIC tiende a decrecer en aquellos suelos arenosos y en aquellos con bajos contenidos de materia orgánica [60]. El CIC y el pH se correlacionan positivamente, elevándose la CIC en presencia de pH altos [61].

En la predicción de la CIC, la topografía (DEM), el clima (temperatura y precipitación) y el material parental (litología, geología y textura de suelos), así como la retención de humedad de suelos condicionan la variación de esta propiedad en cuanto condicionan la formación de la matriz nutricional de los suelos a través de la meteorización mineral, la cual en conjunto con los factores climáticos han influido en la configuración textural del suelo, la acumulación de MO y la variación del pH [62].

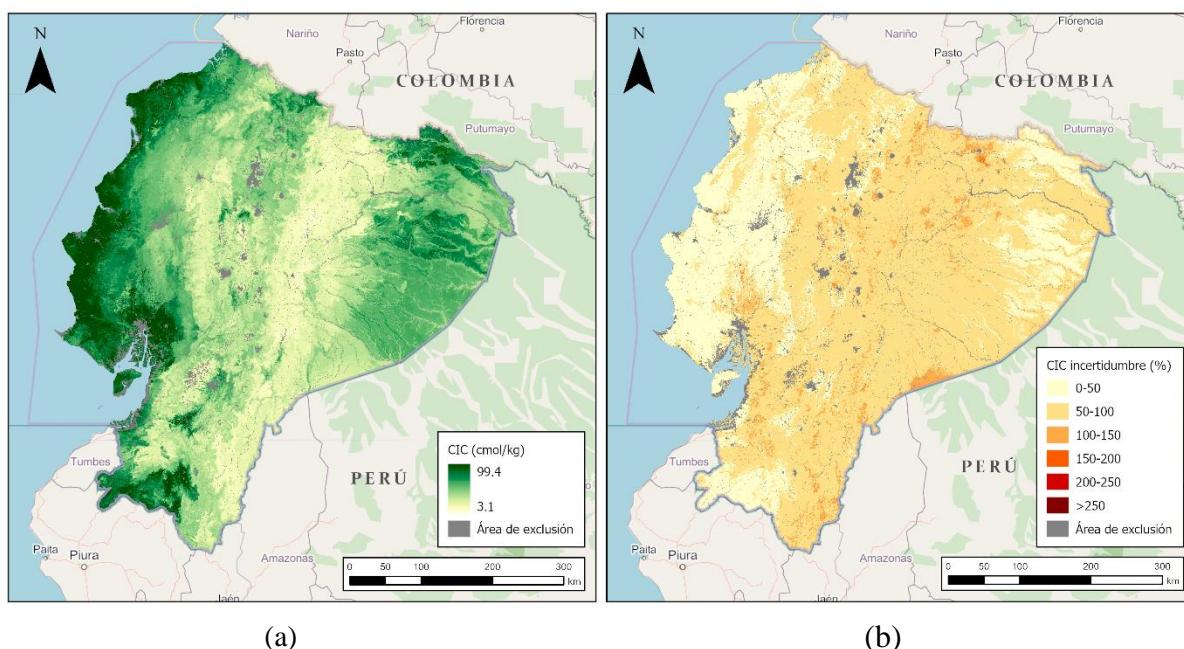


Figura 15. (a) Mapa de predicción de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y (b) Mapa de incertidumbre

En la Figura 15a, se muestra que los valores más altos de CIC fueron predichos en mayor grado en la región de la Costa y en las inmediaciones de la frontera con el Perú al sur del país, seguido por la región noreste de la Amazonía. Estas regiones coinciden con una vasta cobertura forestal inalteradas, donde su pH es alto (Costa) o los niveles de arcilla prevalecen (Amazonía), condiciones que se correlacionan positivamente con la CIC. En la Sierra y el oeste de la Amazonía, donde los valores más bajos fueron predichos en inmediaciones del piedemonte de

la Sierra se presencian texturas menos arcillosas, pero a su vez pH bajos. Los valores promedio por región muestran que la región de la Costa presenta el valor promedio más alto (28.5 cmol/kg), siendo 1.5 veces más alto que la Sierra (18.2 cmol/kg) y la Amazonía (16.5 cmol/kg).

Respecto a la incertidumbre (Figura 15b), aproximadamente el 40% del país muestra una incertidumbre menor al 50% (especialmente para la Costa), lo cual demuestra que las predicciones en dicha región tienen un buen grado de confiabilidad con un valor promedio de 49.1%. En cuanto a la región de la Sierra y la Amazonía, estas presentan las incertidumbres más altas del país con valores promedio de 63.4% y 71.3%, respectivamente. Las incertidumbres mayores al 100% se ubican en conglomerados reducidos a lo largo de diferentes zonas (principalmente en la Amazonía), las cuales pueden ser mejoradas al aumentar el muestreo de suelos. En la región de la Amazonía también se perciben incertidumbres menores al 50%, lo cual es potencialmente causado por predicciones a partir de datos con poca variación ubicados en regiones de la Amazonía con condiciones similares.

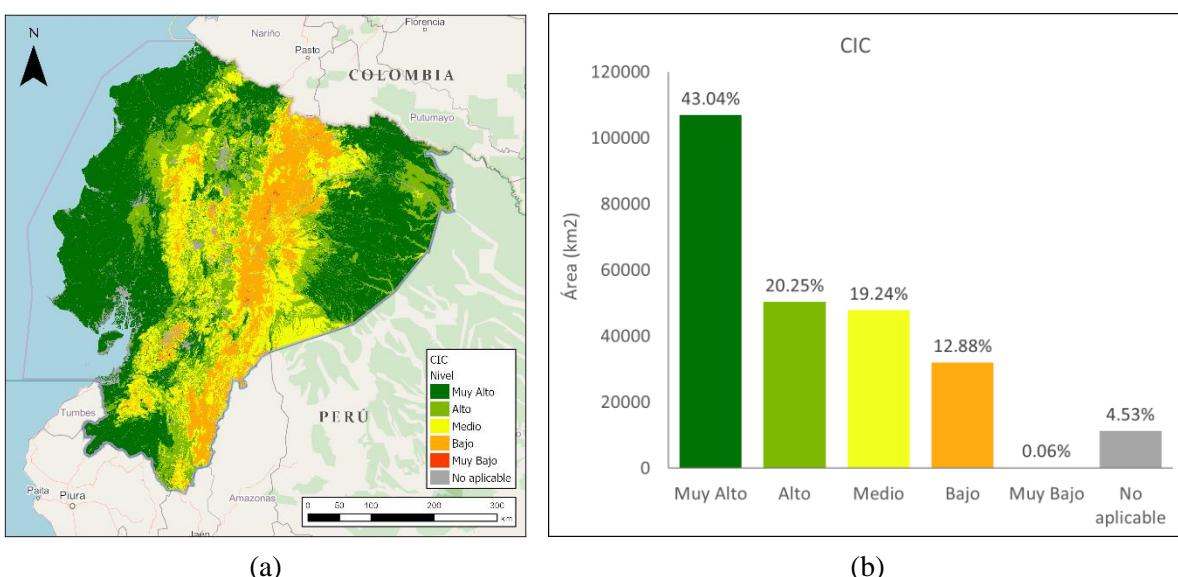


Figura 16. (a) Mapa de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) clasificado y
(b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional

En referencia a la Tabla 2, se clasificó el mapa de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (Figura 16a), y se generó la gráfica de distribución de las clases a nivel nacional (Figura 16b), donde se observa que el 43% de la superficie del Ecuador continental presenta regiones interpretadas como Muy alto para fertilidad (>20 cmol/kg), seguido por el valor Alto (15-20 cmol/kg) con 20.2%, Medio (10-15 cmol/kg) con 19.2%, Bajo (5-10 cmol/kg) con 12.9% y Muy bajo (<5 cmol/kg) con 0.1%.

4.3.6. Suma de bases

La suma de las bases es la suma de los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) intercambiables a excepción del H^+ y Al^{3+} y es una medida de la fertilidad inherente del suelo. La suma de bases indica el grado de resistencia que tiene un suelo al cambio del pH [63] y se ve afectada por la acidez de los suelos, especialmente a través del lavado de bases provocado por un movimiento de cationes a capas inferiores del suelo por lixiviación [64]. Al reducirse el pH de los suelos, la disponibilidad de Ca, Mg, Mo y P disminuye, mientras la disponibilidad de Fe, Mn, B, Cu y Zn aumenta [65]. En suelos erosionados y dominados por minerales como la caolinita, la suma de bases suele tener valores bajos [66].

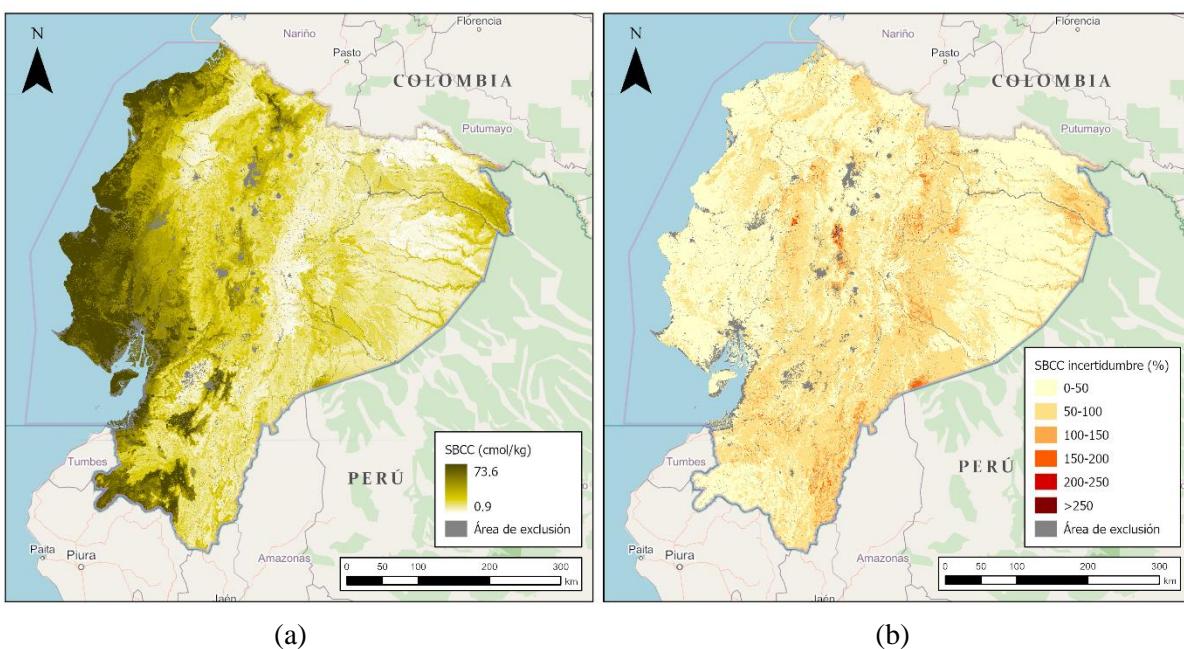


Figura 17. (a) Mapa de predicción de la Suma de Bases (SBCC) y (b) Mapa de incertidumbre

En la predicción de la SBCC (Figura 17a) fueron empleadas covariables referentes a la topografía (DEM), el clima (temperatura y déficit hídrico), y el material parental (litología y geología), así como algunas propiedades de suelos (Régimen humedad suelos, Cond. Eléctrica, Porc. Sodio Interc.). Espacialmente se observa un gradiente decreciente de oeste a este, siendo la Costa la región con valores promedio más altos (22 cmol/kg), seguido por la Sierra (11.4 cmol/kg) y en último lugar la Amazonía (5.5 cmol/kg), en cuya región los suelos son predominantemente arcillosos. A lo largo de la Sierra se identifican regiones relativamente altas (>15 cmol/kg) en inmediaciones de los centros urbanos y regiones agrícolas, mientras que en la Amazonía los valores más altos son predichos a lo largo de las laderas de los ríos y en la vasta región inundable al noreste de la Amazonía. Estas predicciones dan indicios del potencial en términos de fertilidad que ofrece la región de la Costa en comparación con aquellos de la Amazonía.

La incertidumbre de esta propiedad (Figura 17b) evidencia que la variación de las predicciones se ubica mayoritariamente entre un 0-50% para las regiones de la Costa y Amazonía y un 50-100% para la Sierra, siendo sus valores promedio 49.1%, 53.5% y 55.2%, respectivamente. En inmediaciones a centros poblados, donde existe una alta actividad agrícola se presentan igualmente los valores más altos de incertidumbre (>150%). Al igual que para la CIC y otras propiedades, se recomienda aumentar el muestreo en la Amazonía y aquellas áreas con escasez de datos de campo sin importar que los valores de incertidumbre sean bajos.

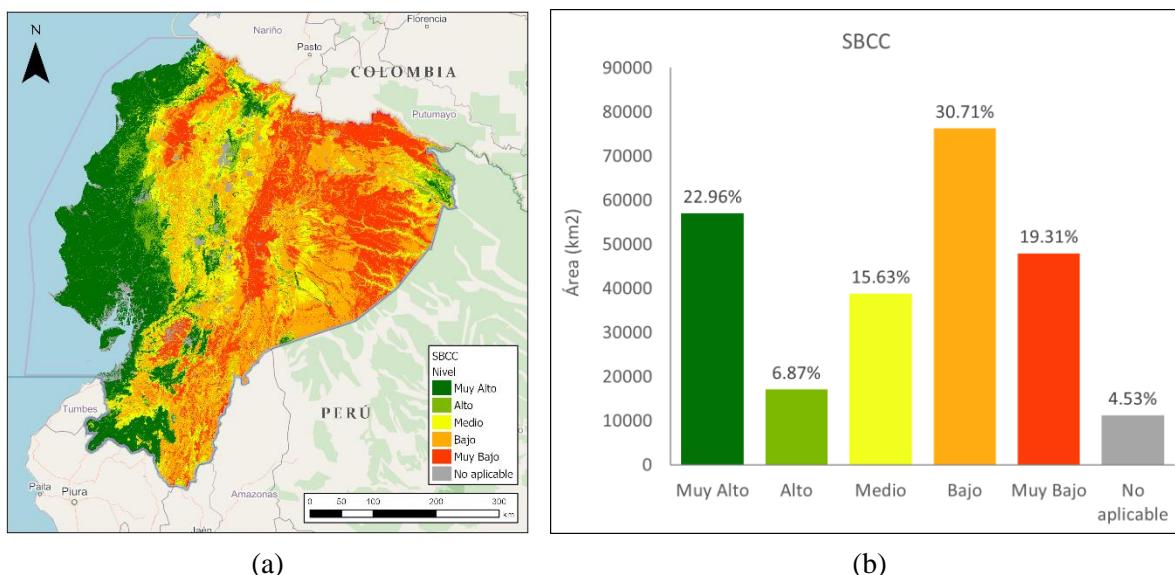


Figura 18. (a) Mapa de la Suma de Bases (SBCC) clasificado y
(b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional

De acuerdo con la Tabla 2, se clasificó el mapa de la Suma de Bases (SBCC) (Figura 18a), y se generó la gráfica de distribución de las clases a nivel nacional (Figura 18b), donde se presenta que el 30.7% de la superficie contiene niveles interpretados como Bajo para fertilidad (4-8 cmol/kg), seguido por el valor Muy alto (>16 cmol/kg) con 23%, Muy bajo (<4 cmol/kg) con 19.3%, Medio (8-12 cmol/kg) con 15.6% y Alto (12-16 cmol/kg) con 6.9%.

4.3.7. Saturación de bases

La saturación de bases es el porcentaje de la CIC ocupada por los cationes básicos Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ . Suelos con baja SatCC poseen bajas cantidades de cationes básicos provocando que las cargas negativas del coloide sean neutralizadas por H^+ y Al^{3+} . El suelo en este caso probablemente será ácido, e incluso puede contener aluminio a un nivel tóxico para las plantas generando una deficiencia de nutrientes, cambios en la biota del suelo y a la degradación general de su salud [67,68]. En suelos con pH menor a 5.4, los cationes ácidos de Al^{3+} presentan una concentración significativa que dificulta el crecimiento de las plantas. Entre más bajo sea el pH más tóxica es la concentración de Al^{3+} [59].

La SatCC es una propiedad dinámica del suelo afectada por condiciones climáticas, geoquímicas y ambientales [67,69], en las cuales factores como el material parental, el clima, y otros factores han sido imprescindibles. En la predicción de esta variable, se observa que la precipitación, DEM, temperatura, régimen de humedad de suelos, geología y época geológica de formación son las covariables más importantes.

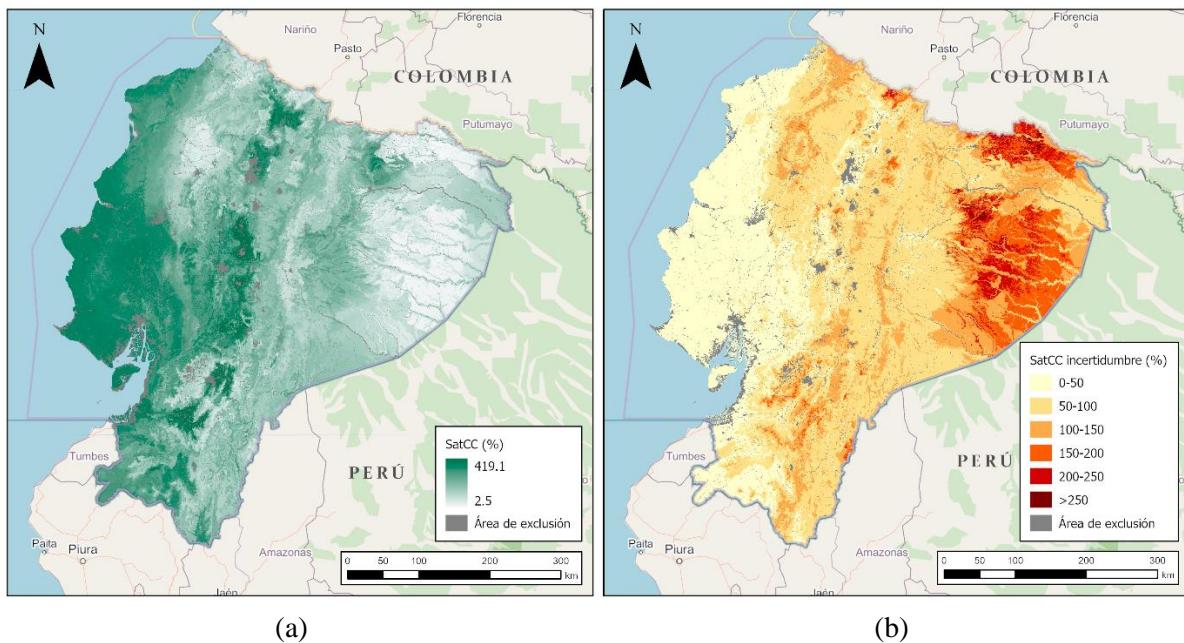


Figura 19. (a) Mapa de predicción de la Saturación de Bases (SatCC) y (b) Mapa de incertidumbre

Los patrones espaciales de la SatCC se asemejan en gran medida a los de la CIC y SBCC. En la Figura 19a se observa que los valores promedio más altos del porcentaje de saturación de bases se ubican en la región de la Costa (76.1%), seguido por la Sierra (62.5%) y la Amazonía (35.5%). En la región de la Sierra se predijeron valores altos alrededor de las urbes en los altiplanos de los Andes, cuya actividad principal es la agricultura y cuyo pH tiende a ser elevado, dando lugar a una mayor disponibilidad de bases. En esta misma región, encontramos los Molisoles, suelos con altos contenidos de saturación de bases [66]. Cabe destacar que las predicciones de esta propiedad se correlacionan en gran medida con las predicciones de la suma de bases. En la Amazonía se presentan los menores valores, posiblemente como producto de las altas precipitaciones y altas temperaturas, procesos progresivos de lixiviación y liberación de hidrógenos (H^+) [65,70].

La incertidumbre de esta propiedad (Figura 19b) evidencia que la región de la Costa presenta predicciones más estables (valor promedio = 35.1%) que las observadas en la Amazonía, región en la cual se evidencian las incertidumbres promedio más altas (112.3%). En la región de la Sierra por su parte, se evidencia una incertidumbre promedio de 70.7%. Estos valores muestran una confiabilidad mayor en la región de la Costa, región que también posee un gran despliegue de muestreo de campo, mientras que para el resto del territorio se presentan incertidumbres del

50 al 100%. En la Amazonía se evidencia un efecto diferencial al ser comparado con la suma de bases, demostrando la existencia de una variación de la tendencia de los datos de campo y las covariables empleadas para la predicción. Este efecto genera una mayor dispersión para las predicciones del porcentaje de saturación que para las de suma de bases.

Como se muestra en la Tabla 2, se clasificó el mapa de Saturación de Bases (SatCC) (Figura 20a), y se generó la gráfica de distribución de las clases a nivel nacional (Figura 20b), donde se presenta que el 28.4% de la superficie del Ecuador continental presenta regiones interpretadas como Muy alto para fertilidad ($>70\%$), seguido por el valor Medio (35-50%) con 23.1%, Bajo (10-35%) con 21.8%, Alto (50-70%) con 17.4% y Muy bajo (<10%) con 4.7%.

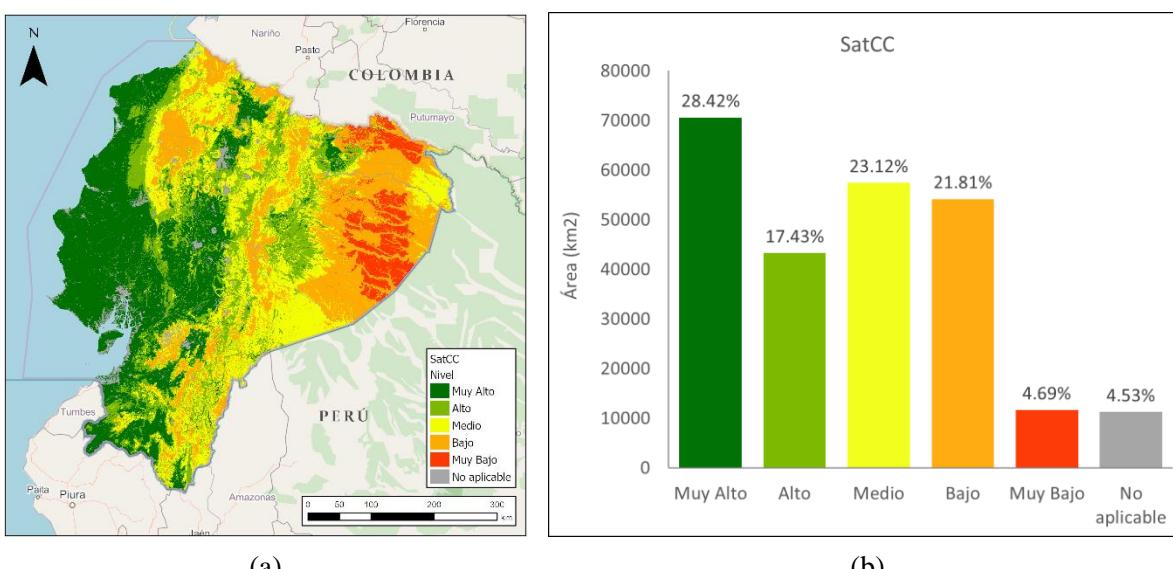


Figura 20. (a) Mapa de Saturación de Bases (SatCC) clasificado y
(b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional

4.3.8. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica, definida como la capacidad de flujo de corriente en el suelo [71], es una medida de la concentración de sales en los suelos y es un buen indicador de la disponibilidad y pérdida de nutrientes, de la textura del suelo y la disponibilidad de agua. Un exceso de sales altera el equilibrio del suelo y el agua, afectando el crecimiento de las plantas, su rendimiento, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana [37]. La conductividad eléctrica se ve afectada en gran medida por la actividad humana, principalmente por la agricultura intensiva, la irrigación y la aplicación inadecuada de fertilizantes [37]. En zonas áridas, los niveles de sales son elevados debido a la falta de su lavado por parte de las precipitaciones, mientras que, en zonas con alta pluviosidad, las sales solubles son descargadas hacia el mar a través de las aguas subterráneas. Las sales también se acumulan en zonas de topografía baja, donde se depositan sales arrastradas por la escorrentía de las aguas arriba [72].

Las principales covariables responsables de su predicción para el Ecuador fueron la radiación solar, el DEM, el nivel base del canal, la unidad genética y el NDVI, covariables que encapsulan aquellos factores mencionados anteriormente.

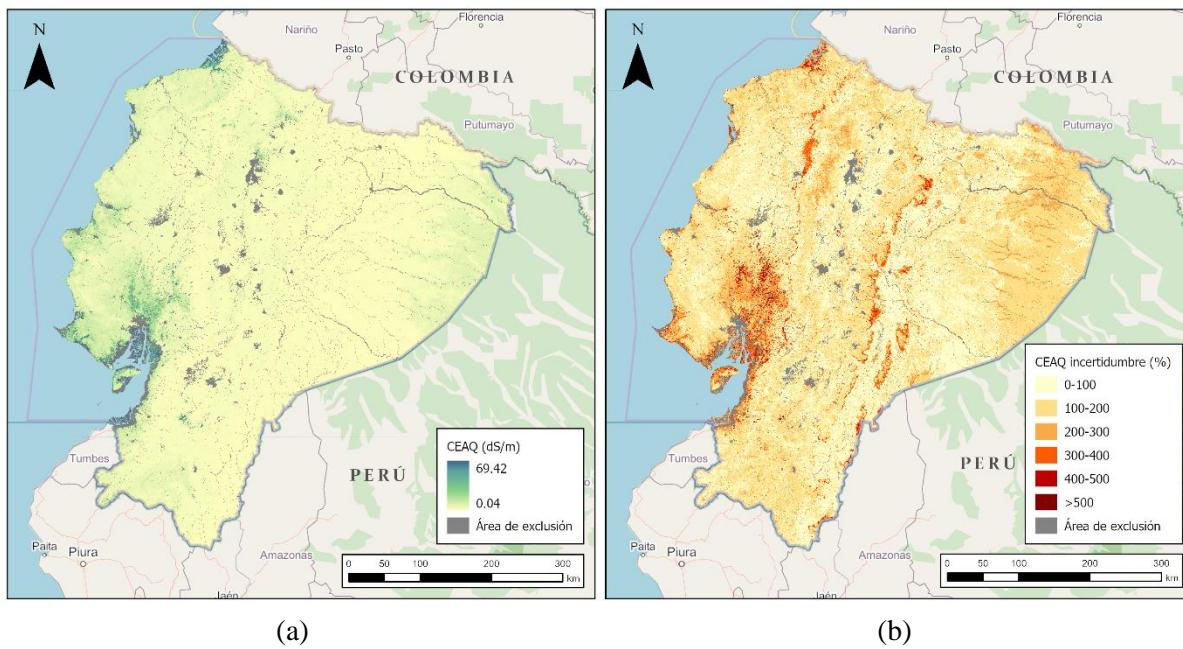


Figura 21. (a) Mapa de predicción de Conductividad Eléctrica (CEAQ) y
(b) Mapa de incertidumbre

En la Figura 21a, se evidencia como la mayoría del territorio nacional presenta una conductividad eléctrica (medida en agua) muy baja. Los valores promedio de conductividad eléctrica respectivos para cada región son: Amazonia = 0.1 dS/m, Sierra = 0.2 dS/m y Costa = 0.6 dS/m. En esta última región, se presentan los valores más altos del país, los cuales son atribuidos a lugares de explotación de sal (Cantón Salinas), las Costas de los manglares (provincias de Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas y El Oro) y cultivos de camarón (provincias del Guayas y El Oro). Al extremo oeste del país (provincia de Santa Elena), principalmente en las zonas áridas existen regiones de explotación salina, en las cuales los suelos por naturaleza geológica tienen altos niveles de sales, mientras que en otras regiones costeras los altos niveles se pueden presentar por procesos de inundación marítima o debido a la intrusión marina en los acuíferos que provoca la subida de sales a la superficie. En las zonas arroceras en las inmediaciones de Guayaquil, se predijeron valores altos, los cuales pueden ser explicados por el uso intensivo y la erosión de los suelos por parte de las arroceras que aumentan la tolerancia de los suelos a sales.

La incertidumbre de la conductividad eléctrica (Figura 21b) es la tercera más grande del set de propiedades mapeadas (valor promedio nacional de 132.5%), solo por detrás del fósforo y potasio disponibles. Esta condición se ve reflejada en las incertidumbres promedio de cada región, las cuales son bastante altas (Sierra = 120.9%, Amazonia = 125.7% y Costa = 155.9%).

A lo largo de la Costa del Pacífico y la planicie de Guayaquil (región de la Costa) donde se evidencian los valores predichos más altos de conductividad eléctrica, se evidencian las mayores incertidumbres. Estas altas incertidumbres son producto de una heterogeneidad regional atribuida al manejo o a la génesis del suelo. Algunas zonas dentro del territorio nacional también presentan incertidumbres por encima del 300%, con patrones atribuidos a la falta de predicción de algunas covariables. Por lo anterior, es ideal concentrar esfuerzos para aumentar el muestreo de suelos de esta propiedad en dichas áreas de mayor incertidumbre y especialmente en aquellas en cercanía a salineras y ambientes áridos.

Como se muestra en la Tabla 2, se clasificó el mapa de Conductividad Eléctrica (CEAQ) (Figura 22a), y se generó la gráfica de distribución de clases a nivel nacional (Figura 22b), donde se presenta que el 94.5% de la superficie contiene niveles no salinos (<2 dS/m), seguido por ligeramente salino (2-4 dS/m) con 0.5%, Medianamente salino (4-8 dS/m) con 0.3%, Fuertemente salino (8-16 dS/m) con 0.1% y Extremadamente salino (>16 dS/m) con menos de 0.1%.

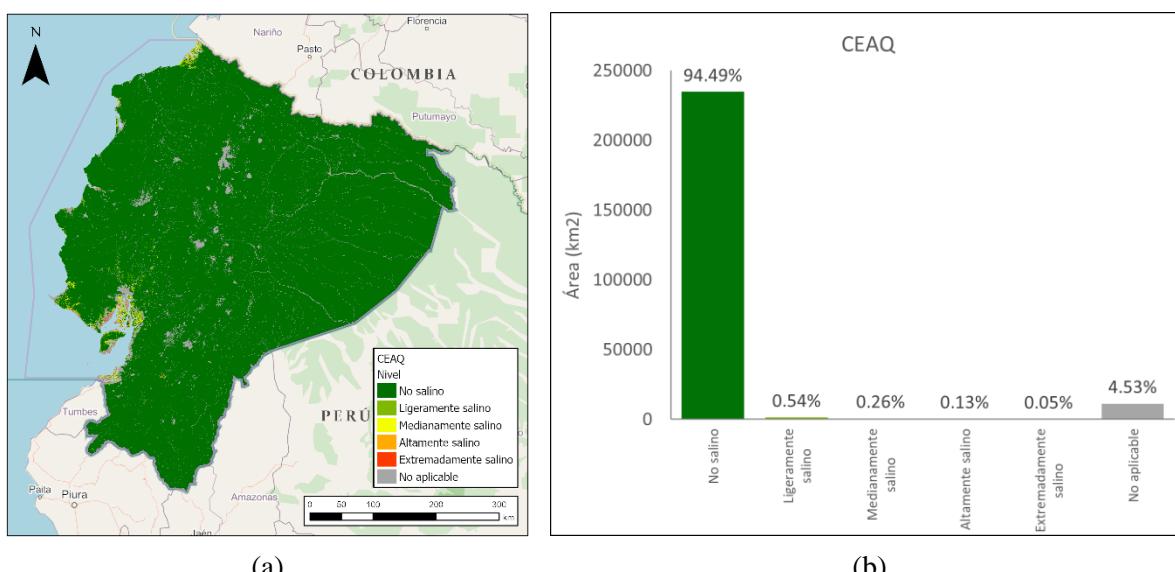


Figura 22. (a) Mapa de Conductividad Eléctrica (CEAQ) clasificado y
(b) Gráfica de distribución de clases a nivel nacional

4.3.9. Textura de los suelos

La textura del suelo se refiere a la proporción de partículas arena, limo y arcilla que conforman la fracción mineral del suelo. Las partículas del suelo se clasifican dependiendo su tamaño: arenas entre 2 mm y 0.05 mm, limo entre 0.05 mm y 0.002 mm y arcilla menor a 0.002 mm. La textura del suelo es una propiedad muy estable que influye en las propiedades fisicoquímicas del suelo y se obtiene con base en las fracciones de arena y arcilla, empleando el triángulo de texturas desarrollado por la USDA [73]. Esta propiedad influye en la retención y movimiento de nutrientes y agua en el suelo, la resistencia al crecimiento de las raíces, la capacidad al

laboreo, así como en el riesgo a la erosión de los suelos. En términos generales, los suelos arcillosos tienden a tener una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes con respecto a los suelos arenosos, en los cuales el agua se infiltra y percola más fácilmente y consigo los nutrientes, requiriendo una mayor cantidad de agua y fertilización en su manejo [74,75]. La tasa de descomposición de la hojarasca y la respiración microbiana es igualmente mayor en los suelos arcillosos que en los arenosos [73].

La textura de los suelos se ve influenciada por varios factores tales como el clima, el material parental, la topografía, los organismos, y el tiempo. Todos ellos responsables de los procesos de meteorización y desarrollo de los suelos. En las Figuras 23a y 24a, se observa la distribución espacial de las predicciones para arcilla y arena. El limo para la clasificación textural (Figura 25) se determinó sumando la arena y arcilla y restando del 100, ya que la suma del porcentaje de arena, limo y arcilla deben ser 100%. La predicción de los contenidos de arcilla y arena del suelo, fueron influenciados principalmente por covariables pertenecientes al material parental, el clima y la topografía. En ambos casos se empleó el mismo set de covariables, con una diferencia y es que en la arcilla se empleó la época geológica la cual hace referencia al componente de edad.

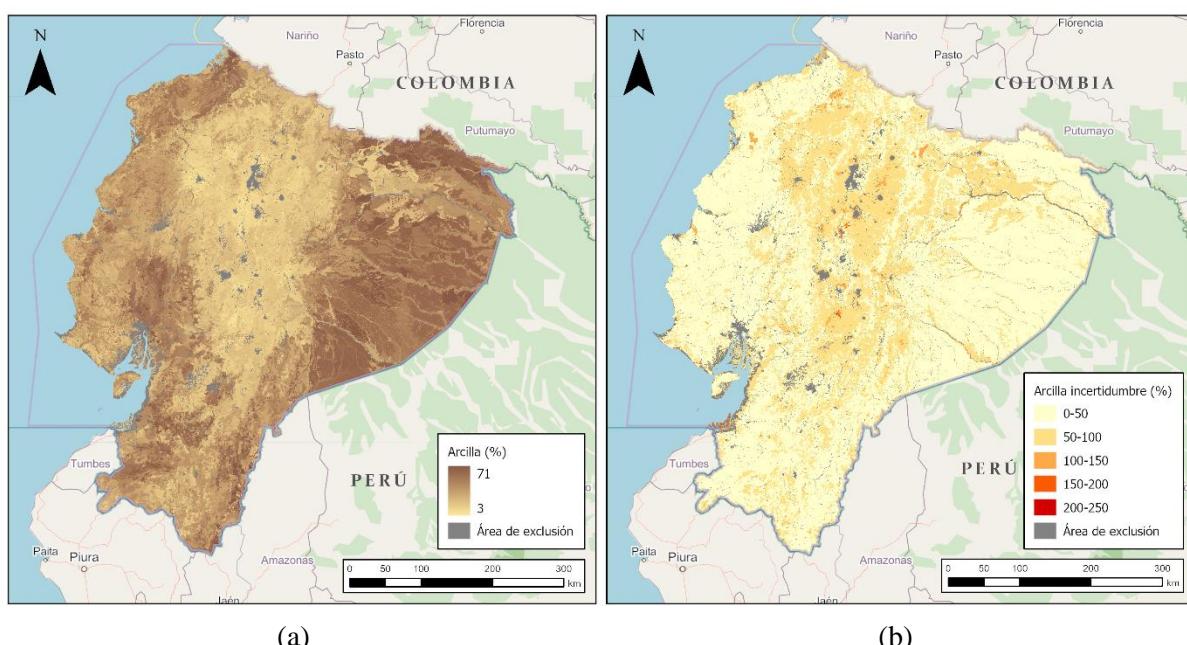


Figura 23. (a) Mapa de predicción de arcilla y (b) Mapa de incertidumbre

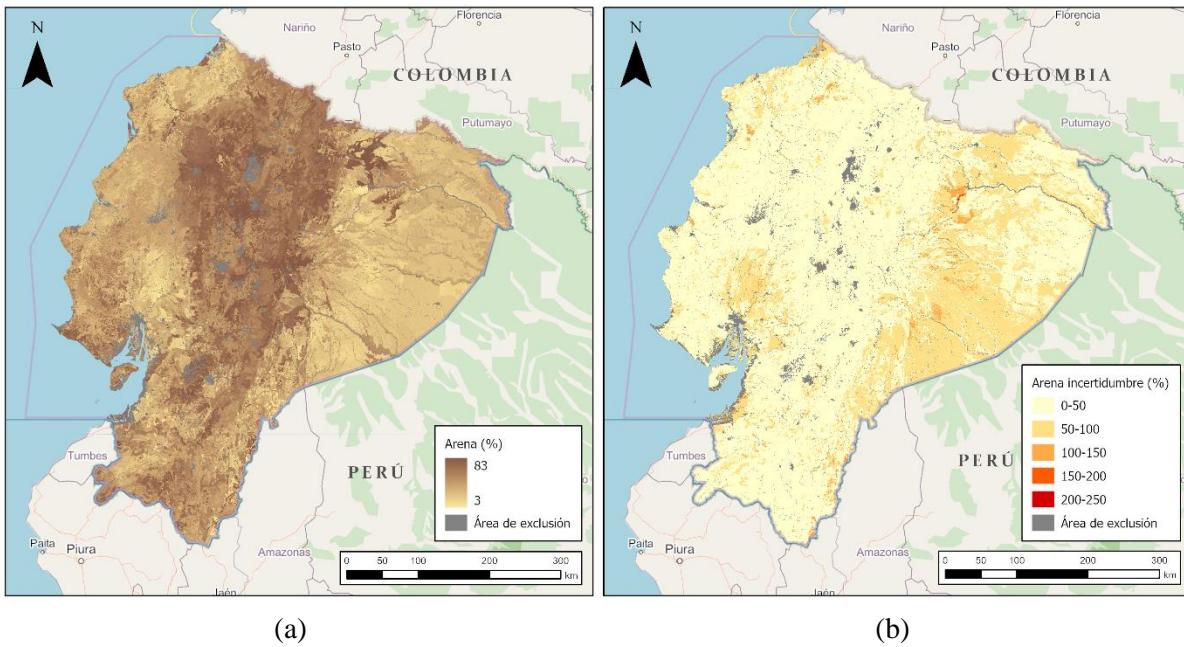


Figura 24. (a) Mapa de predicción de arena y (b) Mapa de incertidumbre

Los valores promedio más altos de arcilla fueron predichos principalmente en la región de la Amazonía (32%), donde a su vez se predijeron los valores más bajos para la arena (31%). En la Sierra se evidencia una situación contraria, mostrando valores más altos para arena (44%) y menores para arcilla (19%). En la región de la Costa (valor promedio de arcilla = 29% y arena = 31%) se observan contenidos más altos de arcilla en la parte norte y en inmediaciones de las regiones arroceras de Guayaquil, mientras valores más bajos se predijeron en el extremo oeste en cercanías a la costa pacífica.

En cuanto a la incertidumbre (Figuras 23b y 24b) de estas 2 propiedades se observa que en ambos casos esta se encuentra por debajo del 50% en la mayoría del territorio nacional. Incertidumbres entre el 50 y 100% se encuentran ubicadas principalmente en las regiones de la Sierra y la Amazonía, para arcilla y arena respectivamente. La incertidumbre promedio para cada propiedad por región se detalla a continuación. Arena: Sierra = 28.3%, Costa = 39.8% y Amazonia = 48.1%; Arcilla: Sierra = 50.3%, Costa = 39.5% y Amazonia = 43.6%.

En la Figura 25 se muestran las diferentes clases texturales en la cual se muestra que la clase textural predominante en el país es la arcillosa con un porcentaje de ocupación del 30% del territorio nacional, seguido por los suelos de tipo franco que se ubican principalmente a lo largo de la Sierra con una superficie de 25%, los suelos arenosos ocupan únicamente un 2% de la superficie y se encuentran ubicados principalmente en la zona oeste de la Costa.

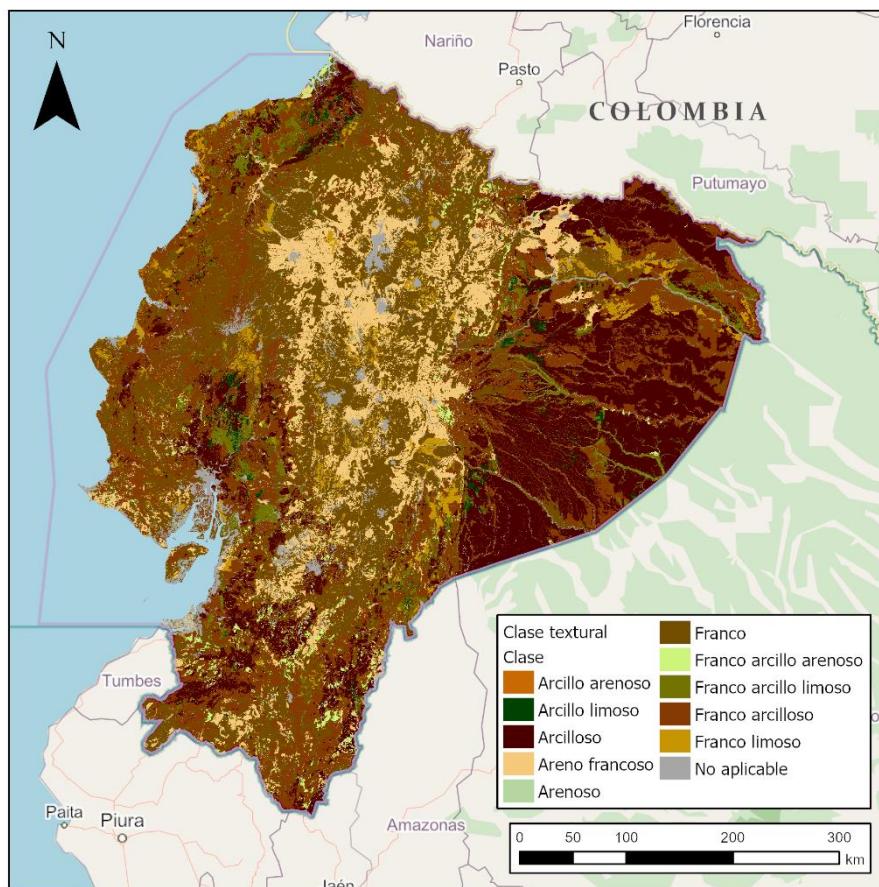


Figura 25. Mapa nacional de clases texturales de suelos

4.4. Mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental

Las propiedades químicas del suelo pueden ser consideradas como posibles indicadores de la fertilidad de los suelos [76]. Los productos desarrollados a partir del mapeo digital de suelos (MDS) pueden ser traducidos en información para la toma de decisiones a nivel espacial [77]. El MDS se ha empleado de manera muy efectiva para el modelado cuantitativo de atributos del suelo difíciles de medir, tales como el mapeo de la fertilidad química del suelo [78]. La distribución espacial de la fertilidad del suelo (Figura 26) es clave para lograr la producción sostenible de la tierra y un recurso esencial para apoyar la evaluación y planificación del uso del suelo, mejorar el rendimiento de los cultivos y monitorear cambios en la fertilidad que puedan llevar a degradación [79].

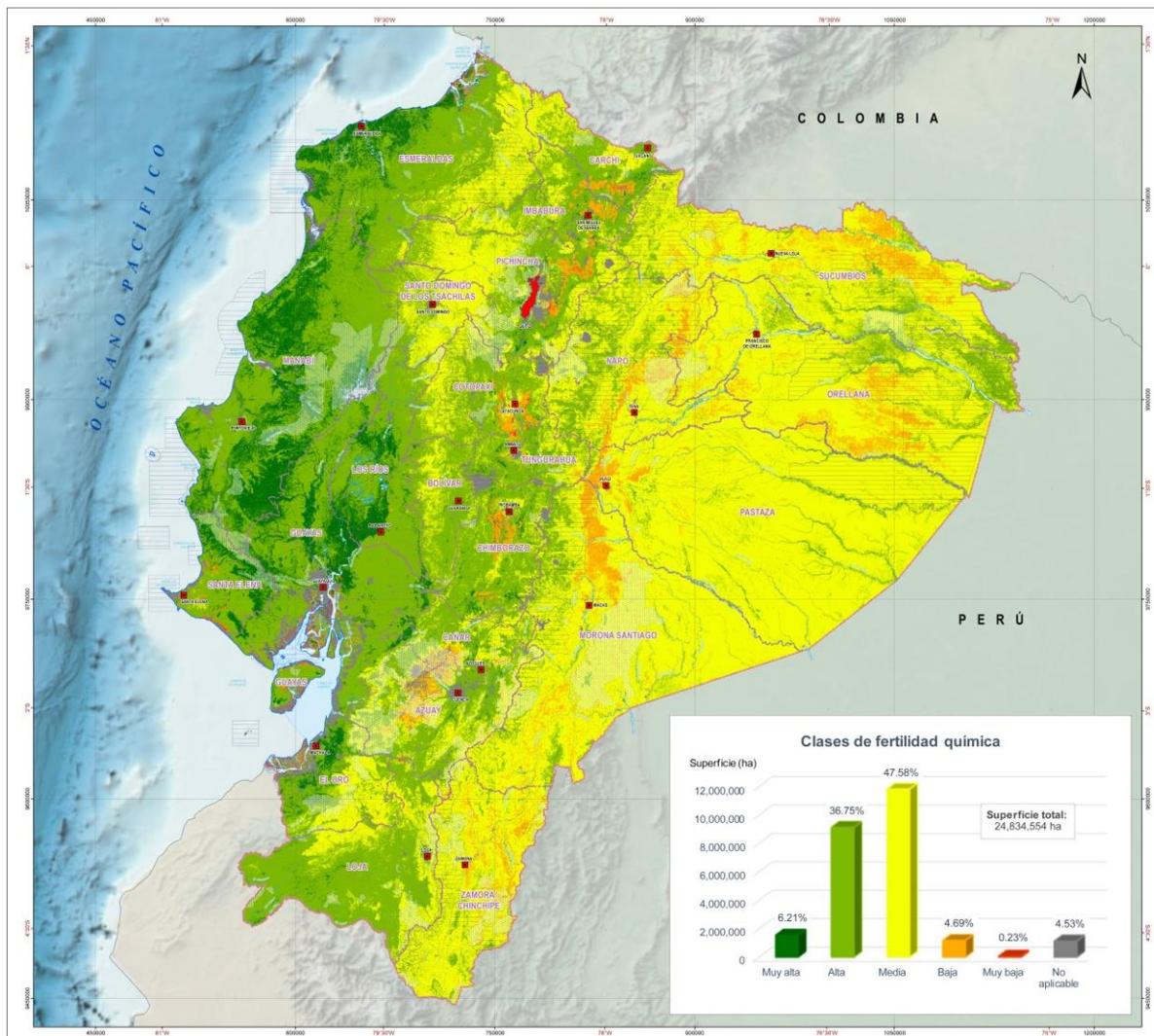


Figura 26. Mapa de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental, resolución espacial 30 m

A nivel nacional, de las 248.345,54 km² de superficie continental, el 47.58% de los suelos contienen fertilidad Media, el 36.75% corresponde a la categoría Alta, el 6.21% dentro de la categoría Muy alta, 4.69% Baja, 0.23% Muy baja y el 4.53% corresponde a las zonas de exclusión o No aplicable, esta última categoría contiene áreas que no son suelo, como: cuerpos de agua, zona antrópica, glaciares, eriales, e infraestructura principalmente.

Los suelos del país se caracterizan por su alta variabilidad. En la Amazonía, los suelos aluviales y aquellos derivados de cenizas volcánicas cercanos a la cordillera son los únicos con limitantes poco importantes para la actividad agrícola. El resto de la Amazonía presenta suelos hidromórficos aluviales o ferralíticos pobres con severas limitaciones para la agricultura [80]. Esta región posee un 78.66% de su superficie clasificada como fertilidad Media, en segundo lugar, una fertilidad Alta con un 11.5%, seguido por una fertilidad Baja (7.14%) y con menos del 1% de su superficie las clasificaciones “Muy alta” y “Muy baja” (Figura 27).

La Amazonía se caracteriza principalmente por tener suelos ácidos a muy ácidos, niveles altos de materia orgánica, ausencia casi total de fósforo disponible, un nivel bajo de potasio disponible, baja saturación de bases. Esta región presenta suelos lavados o lixiviados con liberación de óxidos de hierro y aluminio en niveles tóxicos. La acumulación de materia orgánica y la mayor actividad microbiana en los primeros centímetros del suelo aportan muy poco a la fertilidad de esta región, debido a estas condiciones no son capaces de retener los cationes esenciales, lo que en resumen representa una fertilidad media o baja.

Es importante mencionar que las medidas de regulación adecuadas de la acidez y alcalinidad del suelo son válvulas para aliviar la presión de la degradación del suelo. Los cambios anormales en la acidez y alcalinidad del suelo son una forma importante de degradación, caracterizada por la aceleración de la lixiviación de nutrientes, la reducción de la disponibilidad de nutrientes, la activación de metales pesados y la supresión de actividad microbiana [81–83].



Figura 27. Superficie en porcentaje por región de la fertilidad química de los suelos del Ecuador continental

En la Sierra se presentan fuertes pendientes que limitan la agricultura. En el norte de la Sierra se encuentran suelos ricos en cenizas volcánicas, mientras que la zona central y sur carecen de dicho material, dominando la presencia de suelos fersalíticos pobres [80]. En esta región se presenta un mosaico de microclimas, cada uno con características específicas de temperatura, relieve y precipitación, que han dado lugar a que se hayan generado varios tipos de suelos (Figura 3), generando una heterogeneidad en los niveles de fertilidad (Figura 26). En esta región un 56.63% de su superficie presenta una fertilidad Alta, seguido por una fertilidad Media con un 32.24%, Baja con 4.16%, Muy alta con 1.43% y finalmente Muy baja con 0.2% (Figura 27).

En la Sierra se encuentran suelos con pH ácidos y altos contenidos de materia orgánica en las partes más elevadas, donde existe alta acumulación de ácidos húmicos, más aluminio

intercambiable, muy baja capacidad de intercambio catiónico y saturación de bases. También podemos encontrar suelos fértiles en los valles, con pH ligeramente ácidos a prácticamente neutros, con contenidos de materia orgánica medio, saturación de bases y capacidad de intercambio catiónico muy altos, condiciones favorables para el desarrollo radicular de las plantas.

En la región de la Costa, los suelos presentan una alta fertilidad a lo largo de su planicie, pero disminuye su capacidad de producción agrícola cerca de las zonas de ladera y zonas áridas o salinas. En esta región existen suelos muy fértiles desarrollados sobre rocas antiguas metamórficas y sedimentarias, que permiten una agricultura altamente rentable, con o sin ligeras limitaciones. Estos suelos se caracterizan por presentar pH desde ligeramente ácidos, prácticamente neutros a ligeramente alcalinos, altos a medios contenidos de materia orgánica, valores muy altos de capacidad de intercambio catiónico y saturación de bases. La fertilidad química de los suelos de la Costa, según la Figura 26, presenta mayoritariamente un nivel alto cubriendo un 61.48% de la superficie, seguido por la categoría Muy alta con 21.5%, Media con 8.47%, Baja con 0.98% y Muy baja con 0.65% (Figura 27).

En la Tabla 6, se detalla la superficie en porcentaje a nivel provincial ocupada por las diferentes categorías de fertilidad química para los suelos del Ecuador continental. En esta Tabla se puede observar que las provincias con mayor proporción de fertilidad Muy Alta son las provincias de la Costa: Manabí (33.8%), Santa Elena (26.34%), Los Ríos (20.78%), Guayas (17.75%), Esmeraldas (13.69%) y El Oro (9.28%) y le siguen las provincias de la Sierra con valores menores a 4% de su superficie. En la categoría Alta se encuentran todas las provincias de la Sierra y de la Costa con valores superiores al 37% de su superficie. En la categoría Media se encuentran liderando las provincias de la Amazonía con valores superiores al 68% de su superficie. En las categorías Baja y Muy baja se encuentran todas las provincias, lo que nos muestra que la fertilidad química de los suelos del Ecuador es muy heterogénea.

Tabla 6. Superficie en porcentaje a nivel provincial de la fertilidad química de los suelos del Ecuador continental

Región	Provincia (Superficie %)	Superficie (%)					
		No aplicable	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Amazonia	Morona Santiago (9.7 %)	2.97	0	7.92	79.49	9.62	0.01
	Napo (5.1 %)	3.32	0	8.64	68.14	19.87	0.03
	Orellana (8.8 %)	2.95	0	8.29	74.59	14.17	0
	Pastaza (11.9 %)	1.98	0	2.16	89.75	6.1	0
	Sucumbíos (7.3 %)	3.25	0	10.42	71.5	14.83	0.01
	Zamora Chinchipe (4.2 %)	1.84	0	9.56	78.81	9.76	0.03
Costa	El Oro (2.3 %)	10.9	0.86	1.61	35.39	41.95	9.28
	Esmeraldas (6.3 %)	3.61	0.61	0.87	20.08	61.14	13.69
	Guayas (6.3 %)	13.25	1.5	1.98	0.94	64.59	17.75
	Los Ríos (2.9 %)	4.86	0.02	0.2	3.89	70.26	20.78
	Manabí (7.8 %)	4.14	0.1	0.13	0.25	61.57	33.8
	Santa Elena (1.5 %)	6.46	1.09	2.16	1.36	62.58	26.34
Sierra	Santo Domingo de los Tsáchilas (1.5 %)	4.76	0.01	0.08	57.52	37.6	0.03
	Azuay (3.3 %)	7.34	0.05	9.55	37.29	44.99	0.78
	Bolívar (1.6 %)	3.63	0	0	23.75	71.65	0.96
	Cañar (1.5 %)	6.33	0	5.28	28.23	56.83	3.32
	Carchi (1.5 %)	2.18	0.32	6.14	35.95	53.61	1.81
	Chimborazo (2.5 %)	6.32	0.26	5.55	16.02	68.27	3.58
	Cotopaxi (2.5 %)	5.81	0.52	5.12	32.41	55.56	0.58
	Imbabura (1.9 %)	3.69	0.05	5.52	31.18	58.5	1.04
	Loja (4.5 %)	1.81	0.06	0.35	25.08	71.52	1.17
	Pichincha (3.8 %)	8.64	0.42	4.41	42.65	42.57	1.3
	Tungurahua (1.4 %)	7.81	0.44	2.6	26.66	60.36	2.13

4.5. Fertilidad de los suelos de la Amazonía

La región amazónica del Ecuador representa aproximadamente un 47% del territorio continental, ocupando un área total de 116.607 km² y se extiende en el oeste desde los Andes hacia el este en las extensas planicies de la selva amazónica, representando un 2% del total de la extensión de la cuenca del río Amazonas [84]. Esta región es una de las más grandes reservas ecológicas del Ecuador. Posee un potencial inmenso para proveer múltiples servicios ecosistémicos [85], siendo el recurso más importante de agua fresca y biodiversidad del país, así como para la captura de carbono atmosférico, la regulación hídrica y el hogar de múltiples comunidades indígenas [86,87].

Los suelos de la Amazonía, de manera general, presentan alta acidez, baja disponibilidad de nutrientes, alta lixiviación y acumulación de aluminio tóxico [84,85]. Según los mapas digitales de suelos desarrollados en este estudio, para los primeros 30 cm de profundidad, la Amazonía presenta los valores promedio más bajos de pHAQ: 5.7, KDIS: 0.3 cmol/kg, PDIS: 7.8 mg/kg, CIC: 16.5 cmol/kg, SBCC: 5.5 cmol/kg, SatCC: 35.5 % y CEAQ: 0.1 dS/m, los valores más altos promedio de arcilla (32%) y valores promedio medios de materia orgánica (5.7 %) (Figuras 9 a 24). Estas condiciones llevan a que esta región posea relativamente la fertilidad más baja en comparación con las otras regiones del país. Aproximadamente un 78.7% del territorio de la Amazonía presenta una fertilidad media, seguida por una fertilidad alta de 11.5%, una fertilidad baja de 7.14% y un 0.01% de fertilidad muy alta (Figura 27 y 28).

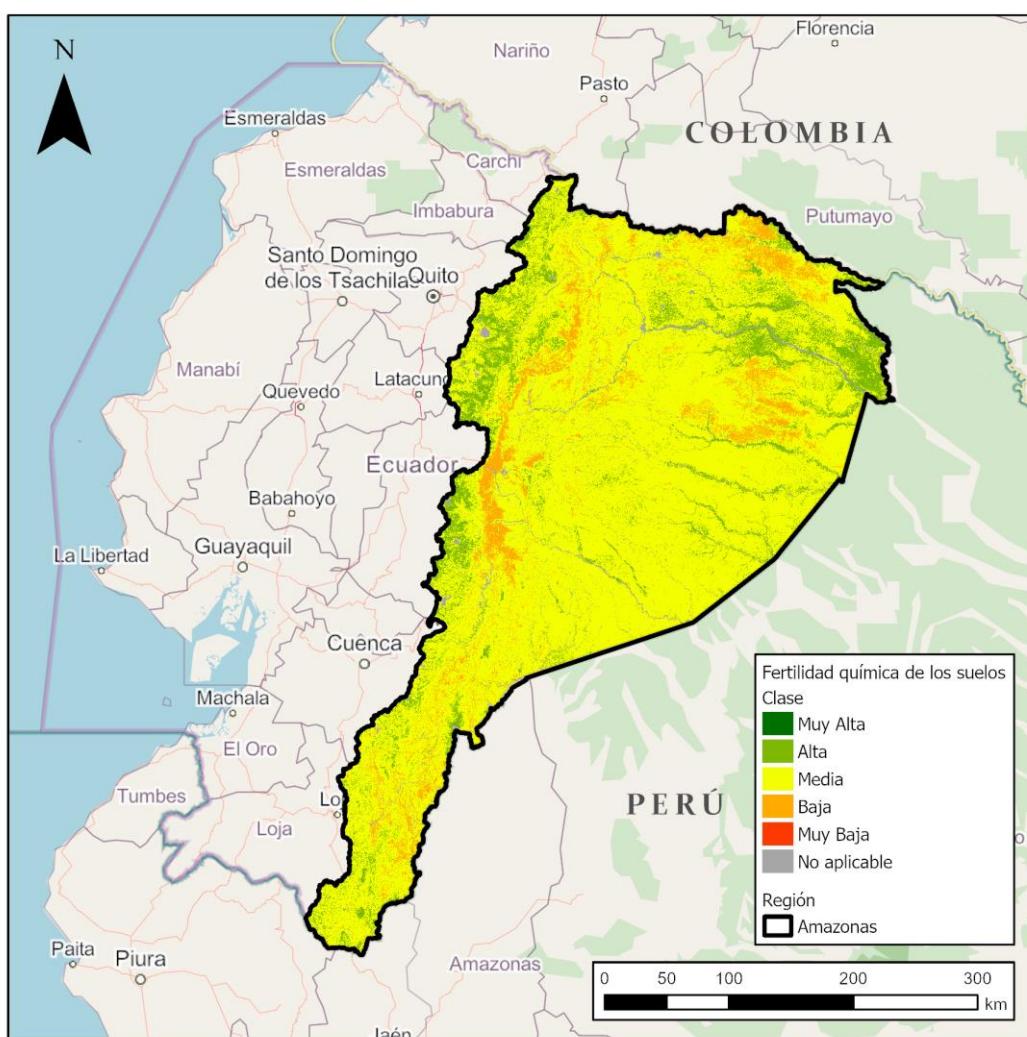


Figura 28. Mapa de fertilidad química de los suelos de la Amazonía ecuatoriana a los 30cm de profundidad de suelo, resolución espacial 30 m

Debido a las condiciones naturales de los suelos de la Amazonía y la densa cobertura por el bosque, cambios en el uso y cobertura del suelo pueden provocar pérdidas de fertilidad, calidad y biodiversidad. Además, el uso excesivo de fertilizantes para corrección de los suelos podría llevar a contaminación de las fuentes hídricas, sustento de múltiples comunidades, plantas y animales [88]. Por lo cual, se busca que esta información contribuya al análisis, la toma de decisiones y la formulación de actividades adecuadas de planeación que conlleven a orientar acciones y recursos para la mitigación de los procesos actuales de degradación y a la conservación de la Amazonía ecuatoriana.

5. CONCLUSIONES

- Se generó el Mapa digital de fertilidad química de los suelos del Ecuador continental, a partir de más de 13.000 perfiles de suelos levantados en el período 2009-2015, el cual servirá como herramienta clave para el diagnóstico de la degradación de los suelos causada por la erosión, desertificación y contaminación.
- El presente mapa constituirá una herramienta efectiva para direccionar las estrategias que permitan tener suelos fértiles y saludables para mitigar los efectos del cambio climático, minimizar los impactos del cambio de uso del suelo, incrementar su productividad sin generar degradación, apoyo al pequeño agricultor, garantizando la seguridad y soberanía alimentaria, reducir los índices de pobreza mediante la toma de decisiones informada y apoyada en datos.
- En relación con la superficie en porcentaje a nivel provincial, en la categoría de fertilidad Muy alta sobresalen las provincias de la Costa, en orden descendente: Manabí (33.8%), Santa Elena (26.34%), Los Ríos (20.78%), Guayas (17.75%), Esmeraldas (13.69%), El Oro (9.28%) y le siguen las provincias de la Sierra con valores menores a 4% de su superficie. En la categoría Alta se encuentran todas las provincias de la Sierra y de la Costa con valores superiores al 37% de su superficie. En la categoría Media se encuentran liderando las provincias de la Amazonía con valores superiores al 68% de su superficie. En las categorías Baja y Muy baja se encuentran todas las provincias continentales, lo que nos muestra que la fertilidad química de los suelos del Ecuador es muy heterogénea.
- Los mapas de propiedades y fertilidad del suelo son una herramienta muy importante que en conjunto con información adicional (clima, uso del suelo, demografía, entre otros), pueden ser muy relevantes como apoyo en la toma de decisiones gubernamentales y planeación a nivel nacional y regional. Estos mapas buscan complementar la información espacial del país y pueden ser empleados para una gran diversidad de aplicaciones como por ejemplo zonificación de riesgo de la degradación de suelos, planificación del uso del

suelo según las características de los suelos, definición de programas de fertilización con buenas prácticas y la identificación de áreas para su conservación.

- Los niveles de incertidumbre son altos en la región Amazónica y en las áreas no previamente muestreadas, por lo que se recomienda aumentar el número de datos teniendo en cuenta una distribución espacial representativa.
- Los resultados de este estudio son una representación de la situación actual basada en los datos de suelo disponibles y las variables de teledetección. En ese sentido, son valiosos como líneas de base para estudios centrados en la estimación del rendimiento potencial, el modelado de simulación de crecimiento de cultivos, la dinámica a largo plazo de los nutrientes del suelo y las existencias de carbono orgánico del suelo.
- Por su nivel de detalle, resolución espacial de 30 m, este mapa se constituye como una herramienta efectiva para realizar planes y proyectos a nivel nacional, provincial, cantonal y parroquial, sin embargo, para una recomendación técnica de fertilización a nivel de finca, se debe tomar muestras en cada lote o finca, enviarlas a laboratorio y en base a ello, dar la recomendación específica.

6. REFERENCIAS

1. FAO. Ecología y enseñanza rural. Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas. Estud FAO Montes Roma, Ital URL <https://www.fao.org/3/w1309s/w1309s00.htm#TopOfPage>. 1996;
2. Pieri C. Fertilité des Terres de Savanes. Ministére la Coopération CIRAD-IRAT. 1989;(Paris, Francia):33–60.
3. Camacho-Tamayo JH, Forero-Cabrera NM, Ramírez-López L, Rubiano Sanabria Y. EVALUACIÓN DE TEXTURA DEL SUELO CON ESPECTROSCOPÍA DE INFRARROJO CERCANO EN UN OXISOL DE COLOMBIA. Colomb For [Internet]. 2016 Dec 25;20(1):5. Available from: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/article/view/9656>
4. Lagacherie P, Mcbratney AB, Grunwald S. Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective edited by P . Lagacherie , A . B . McBratney and M . Voltz. Elsevier, Amsterdam [Internet]. 2007;(ISBN 0-444-52958-6):600. Available from: file:///H:/Library_Kanat/Soils/DSM_Ch43_AreCurrentScientificVisualization.pdf
5. McBratney AB, Mendonça Santos ML, Minasny B. On digital soil mapping [Internet]. Vol. 117, Geoderma. 2003. 3–52 p. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706103002234>
6. Jiménez W, Sánchez D, Ruiz V, Manzano D, Armas D, Jiménez L, et al. Ecuador: Soil Organic Carbon Sequestration Potential National Map National Report. Version 1.0. Year: 2021. 2021. 1–22 p.
7. MAG M de A y G. COBERTURA Y USO DE LA TIERRA Y SISTEMAS PRODUCTIVOS AGROPECUARIOS DEL ECUADOR CONTINENTAL. 2020. 0–68 p.
8. MAG, IEE, SENPLADES. Perfiles de suelos del Ecuador continental 2009-2015, escala 1:25 000. Base de datos armonizada MAG y Universidad de Almería. Quito, Ecuador; 2022.
9. Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy. US Dep Agric NRCS Washingt DC. 2006;(9).
10. MAG. Metodología del Levantamiento de Suelos para el Mapa Geopedológico del Ecuador continental, escala 1:25.000. Quito-Ecuador; 2019.
11. Walkley A, Black IA. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the Chromic Acid Titration method. Soil Sci [Internet]. 1934 Jan;37(1):29–38. Available from: https://journals.lww.com/soilsci/Fulltext/1934/01000/AN_EXAMINATION_OF_THE_DEGTJAREFF_METHOD_FOR.3.aspx
12. Bouyoucos GJ. Directions for making mechanical analyses of soils by the hydrometer method. Soil Sci [Internet]. 1936 Sep;42(3):225–30. Available from:

<http://journals.lww.com/00010694-193609000-00007>

13. Bishop TFA, McBratney AB, Laslett GM. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. *Geoderma*. 1999 Aug 1;91(1–2):27–45.
14. Odgers NP, Libohova Z, Thompson JA. Equal-area spline functions applied to a legacy soil database to create weighted-means maps of soil organic carbon at a continental scale. *Geoderma* [Internet]. 2012 Nov;189–190:153–63. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706112002170>
15. Hengl T, Kampen B, Heuvelink G, Malone B. Package ‘ GSIF ’. 2017;(1):91.
16. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. 2019;(Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>). Available from: <https://www.r-project.org/>
17. Jenny H. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. McGraw-Hill B Co Inc. 1941;
18. NASA, METI, AIST, Systems JS, U.S., Team JAS. ASTER Global Digital Elevation Model V003 [Internet]. distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2019. Available from: <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/>
19. Brenning A, Bangs D, Becker M, Schratz P, Polakowski F. RSAGA: SAGA Geoprocessing and Terrain Analysis. CRAN [Internet]. 2018;1.3.0:1–99. Available from: <https://github.com/r-spatial/RSAGA> License
20. Fick SE, Hijmans RJ. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int J Climatol* [Internet]. 2017;37(12):4302–15. Available from: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5086>
21. Hastie T, Tibshirani R, Jerome F. The Elements of Statistical Learning Data. Data Mining, Inference, and Prediction. Vol. 1, Springer Series in Statistics. Stanford, California: Springer; 2001. 764 p.
22. Genuer R, Poggi J michel, Tuleau-malot C, Genuer R, Poggi J michel, Vsurf CT malot, et al. VSURF : An R Package for Variable Selection Using Random Forests To cite this version : HAL Id : hal-01251924 VSURF : An R Package for Variable Selection Using Random Forests. *R J*. 2015;7(2):19–33.
23. Breiman L. Random forests. *Mach Learn*. 2001;45(1):5–32.
24. Stumpf F, Schmidt K, Goebes P, Behrens T, Schönbrodt-Stitt S, Wadoux A, et al. Uncertainty-guided sampling to improve digital soil maps. *CATENA* [Internet]. 2017 Jun;153:30–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.033>
25. Liaw A, Wiener M. Classification and Regression by randomForest. *R News*. 2003;3(December 2002):18–22.
26. Hengl T, Heuvelink GBM, Kempen B, Leenaars JGB, Walsh MG, Shepherd KD, et al.

Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. PLoS One. 2015;10(6):1–26.

27. Zhou W, Lv TF, Chen Y, Westby AP, Ren WJ. Soil physicochemical and biological properties of paddy-upland rotation: A review. Sci World J. 2014;2014.
28. Behrens T, Schmidt K, Ramirez-Lopez L, Gallant J, Zhu AX, Scholten T. Hyper-scale digital soil mapping and soil formation analysis. Geoderma [Internet]. 2014;213:578–88. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.031>
29. Nikou M, Tziachris P. Prediction and Uncertainty Capabilities of Quantile Regression Forests in Estimating Spatial Distribution of Soil Organic Matter. ISPRS Int J Geo-Information [Internet]. 2022 Feb 11;11(2):130. Available from: <https://www.mdpi.com/2220-9964/11/2/130>
30. Meinshausen N. Quantile Regression Forests. Biometrics. 2006;7(1):983–99.
31. Yigini Y, Olmedo G, Reiter S, Baritz R, Viatkin K, Vargas R. Soil Organic Carbon Mapping Cookbook. 2nd ed. Yigini Y, Olmedo GF, Reiter S, Baritz R, Viatkin K, Vargas RR, editors. 2nd edition. Rome, FAO. Rome, Italy: FAO; 2018. 220 p.
32. Meinshausen N. Package “quantregForest” - Quantile Regression Forests. 2017;1.3-7:1–8. Available from: <http://github.com/lorismichel/quantregForest>
33. Sánchez-Ortega GP, Yepes-Orjuela RH, Mesa-López LJ. Diagnóstico de la fertilidad de los suelos y estimativos sobre las necesidades de fertilizantes para el distrito de riego del río Zulia (Norte de Santander). Agron Colomb. 1996;Volumen XI(2):169–85.
34. IGAC. Descripción y muestreo de suelos. Inst Geogr Agustín Codazzi. 2021;1(IN-GAG-PC05-05. Bogotá, Colombia.):1–76.
35. INIAP. Metodologías de química de suelos. Inst Nac Autónomo Investig Agropecu. 2006;(Quito, Ecuador. Compilado por Cartagena, Yamil).
36. MAG, FAO. Mapeo digital de suelos afectados por salinidad en Ecuador. 2018;
37. USDA-NRCS. Soil Health - Guides for educators: Soil organic matter, Soil pH, Soil Phosphorus, Soil electrical conductivity. United states Dep Agric - Nat resources Conserv Serv. 2014;1(May).
38. Trinidad-Santos A, Velasco-Velasco J. Importancia de la materia organica en el suelo. Agroproductividad. 2016;9(8):52–8.
39. Sadeghian S. La materia orgánica: Componente esencial en la sostenibilidad de los agroecosistemas cafeteros. Cenicafé. Chinchiná; 2010. 61 p.
40. Gutiérrez J, Ordoñez N, Bolívar A, Bunning S, Guevara M, Medina E, et al. Estimation of organic carbon in paramo ecosystem soils in Colombia. Ecosistemas. 2020;29(1):1–10.

41. Munoz MA, Faz A, Mermut AR. Soil Carbon Reservoirs at High-Altitude Ecosystems in the Andean Plateau. In: Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2015. p. 135–53. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-12859-7_4
42. Manning P, de Vries FT, Tallowin JRB, Smith R, Mortimer SR, Pilgrim ES, et al. Simple measures of climate, soil properties and plant traits predict national-scale grassland soil carbon stocks. Wilsey B, editor. *J Appl Ecol* [Internet]. 2015 Oct;52(5):1188–96. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.12478>
43. Kopittke PM, Menzies NW, Wang P, McKenna BA, Lombi E. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environ Int* [Internet]. 2019 Nov;132(July):105078. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
44. Boettinger JL, Howell DW, Moore AC, Hartemink AS, Kienast-Brown S. Digital Soil Mapping [Internet]. Boettinger JL, Howell DW, Moore AC, Hartemink AE, Kienast-Brown S, editors. Vol. 2, *Progress in Soil Science*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2010. 473 p. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706103002234%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Digital+soil+mapping:+Bridging+Research,+Environmental+Application+and+operation#6%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=>
45. Pérez-López E. Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. *Intersedes*. 2013;14(29):6–18.
46. FAO. Propiedades Químicas de los suelos [Internet]. Portal de Suelos de la FAO. 2022. p. 1. Available from: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
47. Zhao J, Dong Y, Xie X, Li X, Zhang X, Shen X. Effect of annual variation in soil pH on available soil nutrients in pear orchards. *Acta Ecol Sin*. 2011 Aug;31(4):212–6.
48. Mng'ong'o M, Munishi LK, Blake W, Comber S, Hutchinson TH, Ndakidemi PA. Soil fertility and land sustainability in Usangu Basin-Tanzania. *Heliyon*. 2021 Aug;7(8):e07745.
49. Toledo M. Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de honduras [Internet]. 2016. 156 p. Available from: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0188461117300481?token=DFAF8CF6F2F3BB297F616A6180FA404057812F1AD922AD584AB56EC26FFBBF9C06002BA981A288F411E5CF1EF749CF62>
50. Britto DT, Kronzucker HJ. Cellular mechanisms of potassium transport in plants. *Physiol Plant*. 2008 Aug;133(4):637–50.
51. Mengel K, Kirkby EA. Principios de nutrición vegetal. *Principios Nutr Veg Inst Int del*

- Potasio. 2000;4ta(1ra):11–535.
52. García LA, Quincke A. El Potasio (K) en la Producción de Cultivos de Invierno. Ser Act Difusion INIA Argentina. 2012;677:9–14.
 53. Armstrong DL, Griffin KP. Potassium for Agriculture. Better Crop With Plant Food [Internet]. 1998;82(3):39. Available from: [https://www.ipni.net/ppiweb/bcrops.nsf/\\$webindex/84CBB51751971AB3852568F000673A10/\\$file/98-3p04.pdf](https://www.ipni.net/ppiweb/bcrops.nsf/$webindex/84CBB51751971AB3852568F000673A10/$file/98-3p04.pdf)
 54. Marín JG. El fósforo del suelo. In: Cátedra de Edafología FAZ UNT Repositorio Institucional Agrosavia Corporación colombiana de investigación agropecuaria [Internet]. 1978. Available from: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/22392>
 55. Nunes R de S, de Sousa DMG, Goedert WJ, de Oliveira LEZ, Pavinato PS, Pinheiro TD. Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. *Front Earth Sci.* 2020;8(September):1–12.
 56. Zia MS, Baig MB, Aslam M, Section LR. Phosphorus Fixation By Different Clay Minerals As Affected By Phosphorus Sources and Water Regimes. *Pak J Agri Sci.* 1992;29(2):162–5.
 57. Zhao D, Li N, Zare E, Wang J, Triantafilis J. Mapping cation exchange capacity using a quasi-3d joint inversion of EM38 and EM31 data. *Soil Tillage Res.* 2020 Jun;200(February):104618.
 58. Emamgholizadeh S, Bazoobandi A, Mohammadi B, Ghorbani H, Amel Sadeghi M. Prediction of soil cation exchange capacity using enhanced machine learning approaches in the southern region of the Caspian Sea. *Ain Shams Eng J.* 2022 Jun;101876.
 59. Sonon LS, Kissel DE, Saha U. Cation Exchange Capacity and Base Saturation-UGA Cooperative Extension Circular 1040. 2017;1–4. Available from: https://secure.caes.uga.edu/extension/publications/files/pdf/C_1040_2.PDF
 60. Yost JL, Hartemink AE. Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Adv Agron.* 2019;158(October):217–310.
 61. Purnamasari L, Rostaman T, Widowati LR, Anggria L. Comparison of appropriate cation exchange capacity (CEC) extraction methods for soils from several regions of Indonesia. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* [Internet]. 2021 Feb 1;648(1):012209. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/648/1/012209>
 62. Heitkamp F, Ahrends B, Evers J, Steinicke C, Meesenburg H. Inference of forest soil nutrient regimes by integrating soil chemistry with fuzzy-logic: Regionwide application for stakeholders of Hesse, Germany. *Geoderma Reg* [Internet]. 2020;23:e00340. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00340>
 63. Filippi R. Mejoramiento de los Niveles de Fertilidad de los Suelos en Predios Lecheros.

Curso de Actualización en Producción Pecuaria. 2011.

64. Rincón Castillo Á. Acidificación de los suelos e intercambio catiónico [Internet]. 2012. 23–29 p. Available from: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/19501>
65. Astorga C, Barrera P, Bastidas F, Caicedo C, Calderón D, Calero A, et al. Agroforestería sostenible en la Amazonía Ecuatoriana, INIAP N°2. Vol. 1. 2018. 133 p.
66. Seybold CA, Elrashidi M, Libohova Z. Soil Survey: Prediction of Sum of Bases Using K-Nearest Neighbor Approach. *J Soil Sci Plant Heal*. 2017;1(1).
67. Rawal A, Chakraborty S, Li B, Lewis K, Godoy M, Paulette L, et al. Determination of base saturation percentage in agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometer. *Geoderma*. 2019 Mar;338(December 2018):375–82.
68. Ouimet R, Camiré C, Furlan V. Effect of soil base saturation and endomycorrhization on growth and nutrient status of sugar maple seedlings. *Can J Soil Sci*. 1996 May 1;76(2):109–15.
69. Osman KT. Soils: principles, properties and management. Springer Science & Business Media,. 2012.
70. Valarezo C. Gestión de la fertilidad del suelo en el trópico húmedo, en la Región Amazónica ecuatoriana y bajo sistemas agroforestales. Univ Nac Loja, Programa Mod los Serv Agropecu Loja, Ecuador. 2004;1(1):141.
71. Othaman NNC, Isa MNM, Ismail RC, Ahmad MI, Hui CK. Factors that affect soil electrical conductivity (EC) based system for smart farming application. In: AIP Conference Proceedings. 2020. p. 020055.
72. Cremona M, Enriquez A. ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO QUE CONDICIONAN SU COMPORTAMIENTO: El pH y la conductividad eléctrica. Presencia. 2020;73:5–8.
73. Upadhyay S, Raghubanshi AS. Determinants of soil carbon dynamics in urban ecosystems. In: Urban Ecology [Internet]. Elsevier; 2020 [cited 2022 Aug 24]. p. 299–314. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128207307000161>
74. Moral FJ, Rebollo FJ. Characterization of soil fertility using the Rasch model [Internet]. Vol. 17, Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2017. Available from: www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/publicat/FAOBUL4/
75. Vivas I, Garcia M, Hernandez L, Miranda I, Ramos A. Apuntes de agronomía I. Chapingo, Mexico: Universidad autónoma de Chapingo; 2014.
76. Lal R. Carbon sequestration. *Philos Trans R Soc B Biol Sci*. 2008;363(1492):815–30.
77. Arrouays D, McBratney A, Bouma J, Libohova Z, Richer-de-Forges AC, Morgan CLS, et al. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever

- better. *Geoderma Reg* [Internet]. 2020;20:e00255. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>
78. Srisomkiew S, Kawahigashi M, Limtong P, Yuttum O. Digital soil assessment of soil fertility for Thai jasmine rice in the Thung Kula Ronghai region, Thailand. *Geoderma* [Internet]. 2022 Mar;409(June 2021):115597. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706121006777>
79. Villarreal JE. Mapas de fertilidad como herramienta para zonificación de suelos en Panamá. *Inf Agronómicas Hisp.* 2013;1(1):8.
80. Espinosa J, Moreno J, Bernal G. Suelos Ecuador - Características, Uso y Manejo. 2022.
81. Aciego Pietri JC, Brookes PC. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil. *Soil Biol Biochem* [Internet]. 2008 Jul;40(7):1856–61. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038071708001168>
82. Daliakopoulos IN, Tsanis IK, Koutroulis A, Kourgialas NN, Varouchakis AE, Karatzas GP, et al. The threat of soil salinity: A European scale review. *Sci Total Environ* [Internet]. 2016;573:727–39. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
83. Han Y, Yi D, Ye Y, Guo X, Liu S. Response of spatiotemporal variability in soil pH and associated influencing factors to land use change in a red soil hilly region in southern China. *Catena* [Internet]. 2022;212(February):106074. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106074>
84. Bravo C., Benítez D., Vargas Burgos J., Alemán R., Torres B., Marín H. Caracterización socio-ambiental de unidades de producción agropecuaria en la Región Amazónica Ecuatoriana: Caso Pastaza y Napo. *RevAmaz Cienc Y Tecnol.* 2015;4:3–31.
85. Huera-Lucero T, Labrador-Moreno J, Blanco-Salas J, Ruiz-Téllez T. A Framework to Incorporate Biological Soil Quality Indicators into Assessing the Sustainability of Territories in the Ecuadorian Amazon. *Sustainability* [Internet]. 2020 Apr 9;12(7):3007. Available from: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/7/3007>
86. López A. V, Espíndola F, Calles L. J. Amazonía ecuatoriana bajo presión. 2013. 58 p.
87. Bravo C, Ramírez A, Marín H, Torres B, Alemán R, Torres R, et al. Factors associated with soil fertility in different land uses of the Ecuadorian Amazon Region. *Rev Electrón vet* [Internet]. 2017;18(11):1–16. Available from: file:///C:/Users/STEVE/OneDrive/Documentos/Bibliografias M/63653574014.pdf
88. Pahalvi HN, Rafiya L, Rashid S, Nisar B, Kamili AN. Microbiota and Biofertilizers, Ecofriendly Tools for Reclamation of Degraded Soil Environs. Vol. 2, Chapter I. 2022.



Ministerio de Agricultura y Ganadería



República
del Ecuador