SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p99116

Efectos de las actividades socioeconómicas sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, El Motilón-Laguna de la Cocha

Effects of socioeconomic activities on the physicochemical properties of the soil, El Motilón-Laguna de la Cocha

Huertas Jenny[1*]✉, Escobar Sofia[1], Cuaspa Sofia[1], Coral-Paredes Eliana[2], Lafaurie Gabriel[1]

[1*] Universidad Mariana, Pasto, Colombia.
[2] Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 99-116 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 14/06/2026 - ACEP.: 04/09/2026

RESUMEN

Los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha, humedal RAMSAR altoandino, sostienen funciones de regulación hídrica, almacenamiento de carbono y protección de la calidad del agua, pero enfrentan presión por agricultura y ganadería. Este estudio evaluó los efectos de dichas actividades sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo en la vereda El Motilón y su coherencia con la planificación territorial. Se compararon tres usos de suelo —conservación, ganadería y cultivo de papa— mediante 18 muestras tomadas a 0–20 cm en parcelas de 24 m². Se determinaron pH, conductividad eléctrica, textura, humedad, densidad aparente y real, porosidad, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico; las diferencias se analizaron con ANOVA y prueba de Tukey. Los resultados se integraron con un análisis multitemporal de coberturas 2002–2020 y con la zonificación del POT de Pasto. Frente al suelo de conservación, los sistemas productivos mostraron pérdida de materia orgánica de 46–60%, incremento de la densidad aparente de 70% en ganadería y 123% en agricultura, reducción de la porosidad y acidificación. La agricultura presentó la mayor degradación física, con mayor humedad asociada a drenaje deficiente y compactación. El análisis espacial evidenció reemplazo de coberturas naturales por pastos y cultivos, así como conflictos entre el uso actual, las zonas agropecuarias sostenibles y áreas de preservación estricta. Se concluye que las prácticas agropecuarias actuales son insostenibles, degradan la salud del suelo y comprometen funciones ecológicas clave, por lo que se requiere restauración, manejo sostenible y fortalecimiento de la gobernanza territorial.

Palabras clave: Degradación del suelo; actividades agropecuarias; propiedades fisicoquímicas; zona ribereña; Laguna de La Cocha.

ABSTRACT

Riparian soils of La Cocha Lake, a high-Andean Ramsar wetland, support hydrological regulation, carbon storage, and water-quality protection functions, but are under pressure from agriculture and livestock activities. This study evaluated the effects of these activities on the physicochemical properties of soil in El Motilón village and their consistency with territorial planning. Three land uses were compared: conservation, livestock, and potato cropping. A total of 18 soil samples were collected at 0–20 cm depth from 24 m² plots. Soil pH, electrical conductivity, texture, moisture, bulk and particle density, porosity, organic matter, and cation exchange capacity were determined; differences were analyzed using ANOVA and Tukey's test. The results were integrated with a multitemporal land-cover analysis from 2002 to 2020 and with the zoning established in Pasto's Land Use Plan. Compared with

conservation soil, productive systems showed a 46–60% loss of organic matter, a 70% increase in bulk density under livestock use, and a 123% increase under agriculture, along with reduced porosity and soil acidification. Agriculture showed the greatest physical degradation, with higher moisture associated with poor drainage and compaction. Spatial analysis revealed the replacement of natural cover by pastures and crops, as well as conflicts between current land use, sustainable agricultural zones, and strict preservation areas. It is concluded that current agricultural and livestock practices are unsustainable, degrade soil health, and compromise key ecological functions; therefore, restoration, sustainable management, and stronger territorial governance are required.

Keywords: Soil degradation; agricultural and livestock activities; physicochemical properties; riparian zone; La Cocha Lake

INTRODUCCIÓN

Los suelos de alta montaña andina desempeñan funciones esenciales en la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y el mantenimiento de la calidad ambiental (Zúñiga et al., 2018). En este contexto, la Laguna de La Cocha, humedal RAMSAR de importancia internacional, depende en gran medida de la integridad de los suelos de su cuenca hidrográfica para conservar sus funciones ecológicas (López et al., 2015). Los suelos ribereños constituyen zonas de amortiguamiento naturales que favorecen la retención de nutrientes, el procesamiento de materia orgánica y la protección de los cuerpos de agua. No obstante, la sustitución de la vegetación nativa por actividades agropecuarias puede alterar estas funciones, incrementando el riesgo de degradación del suelo y afectación de la calidad del agua por el aporte de sedimentos y nutrientes (Romero-Ruiz et al., 2023).

En la vereda El Motilón, ubicada en la zona noroccidental de la Laguna de La Cocha, la expansión de cultivos de papa y la actividad ganadera constituyen las principales presiones sobre los ecosistemas ribereños. Sin embargo, existe información limitada sobre los efectos de estas actividades en las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo bajo tres usos representativos (conservación, ganadería y agricultura) en la vereda El Motilón. Adicionalmente, los resultados se relacionaron con la dinámica de cobertura del suelo entre 2002 y 2020 y con la zonificación establecida en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), bajo la hipótesis de que las actividades agropecuarias generan procesos de degradación edáfica asociados a cambios en el uso y manejo del territorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El estudio se desarrolló en la vereda El Motilón, corregimiento El Encano (Pasto, Nariño), ubicada en la cuenca alta del río Guamuez, en el área de influencia de la Laguna de La Cocha. La zona se localiza entre 2760 y 3400 m.s.n.m., presenta temperaturas medias entre 8 y 12 °C, precipitación anual cercana a 1630 mm y humedad relativa promedio de 86,5%. Se evaluaron tres usos del suelo representativos de la zona ribereña: conservación, ganadería y agricultura (Figura 1).



Figura 1. Zona de estudio. Fuente de consulta: datos tomados del IGAC.

Recolección de muestras de suelo

En cada uso del suelo (conservación, ganadería y agricultura) se estableció una parcela de 24 m². Se aplicó un muestreo en cuadrícula con separación de 2 m entre puntos, recolectando seis muestras disturbadas a una profundidad de 0–20 cm por parcela, consideradas como réplicas para el análisis estadístico (IGAC, 2017). En total, se obtuvieron 18 muestras de suelo

Análisis en laboratorio

Las muestras fueron acondicionadas y analizadas en el laboratorio de la Universidad Mariana, sede Alvernia. Se determinaron las propiedades fisicoquímicas del suelo mediante metodologías estandarizadas descritas en la Tabla 1. Todos los análisis se realizaron por triplicado para cada muestra.

Tabla 1. Metodología para la determinación de parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Método de medición
pH (1:1)	Potenciómetro
Conductividad eléctrica $dS\ \ m^{-1}$	Conductímetro
Textura	Bouyoucos
Humedad (%)	Gravimétrico secado a 105 °C peso constante
Densidad aparente $\left(g\ \ cm^{-3}\right)$	Método del cilindro
Densidad real $\left(g\ \ cm^{-3}\right)$	Método del picnómetro
Porosidad total (%)	Relación entre densidad real y aparente
Materia orgánica (%)	Pérdida por calcinación
Capacidad de intercambio catiónico $\left(meq100g^{-1}\right)$	Titulométrico, acetato de amonio al 1 N a pH 7,0

Fuente de consulta: (Sadzawka et al., 2006).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos para cada propiedad fisicoquímica del suelo fueron analizados mediante estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) de una vía, utilizando el software SPSS Statistics. Este análisis permitió evaluar el efecto del uso del suelo (conservación, ganadería y agricultura) sobre las variables estudiadas e identificar diferencias significativas entre tratamientos. Cuando el ANOVA mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$), se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey para establecer cuáles usos del suelo diferían entre sí. Los resultados se presentan como medias ± error estándar y se representaron gráficamente mediante SigmaPlot versión 12.0.

Como complemento interpretativo de los indicadores fisicoquímicos, se incorporaron los valores del índice de fragilidad dC/dB obtenidos para cada uso del suelo a partir de los datos de carbono orgánico y densidad aparente de esta investigación. La interpretación se realizó bajo el marco conceptual de fragilidad del suelo propuesto por Clunes et al. (2022), que diferencia la fragilidad inherente asociada a las propiedades propias del suelo de la fragilidad añadida generada por presiones antrópicas. Los valores de dC/dB se emplearon como indicador integrado para discutir la pérdida de funcionalidad y la proximidad a condiciones críticas; su comparación con umbrales reportados en otros Andisoles se considera indicativa y no una validación de un umbral local.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fragilidad del suelo como marco para interpretar la degradación

La degradación del suelo no debe interpretarse únicamente a partir de valores absolutos de una propiedad aislada. En suelos volcánicos, propiedades como una baja densidad aparente y una elevada porosidad son características inherentes de su génesis y mineralogía; por ello, cambios relativamente pequeños o moderados respecto a la condición de referencia pueden representar pérdidas funcionales relevantes. Clunes et al., (2022) proponen el concepto de fragilidad del suelo como la susceptibilidad del sistema a perder funciones cuando las presiones externas superan su capacidad de resiliencia. Este marco reconoce una fragilidad inherente, determinada por las características naturales del suelo, y una fragilidad añadida, asociada con intervenciones antrópicas como labranza, tránsito o pisoteo. Cuando la presión excede la capacidad de recuperación, el sistema puede aproximarse a un punto de no retorno, en el cual la restauración de su condición funcional original se vuelve limitada o improbable.

Bajo este enfoque, la condición de conservación se utiliza en este estudio como referencia funcional y los usos ganadero y agrícola se interpretan por la trayectoria conjunta de materia orgánica, carbono orgánico, densidad aparente, porosidad, humedad y rasgos morfológicos. Esta lectura integrada es especialmente importante en Andisoles, donde valores absolutos que podrían parecer favorables al compararlos con suelos minerales pueden ocultar una alteración significativa respecto al estado natural del mismo suelo.

Caracterización morfológica y su relación con el uso del suelo

La caracterización morfológica no se restringió al color y la profundidad. En cada perfil se describieron además estructura, consistencia, condición de humedad, adhesividad/plasticidad, textura al tacto y rasgos redoximórficos (Tabla 2). La interpretación de estos atributos se realizó de manera conjunta con las propiedades fisicoquímicas medidas. En consecuencia, las diferencias de espesor de horizontes y color se consideran evidencias complementarias de alteración y condiciones de drenaje, pero no se emplean de forma aislada para demostrar erosión o compactación

Zona de conservación

El suelo bajo conservación presentó un perfil profundo con horizontes superficiales oscuros, caracterizados por un horizonte A de 20 cm de espesor sobre un horizonte subsuperficial de color marrón muy oscuro (7.5YR 2.5/2). Estos rasgos son característicos de Andisoles de alta montaña y reflejan una elevada acumulación de materia orgánica favorecida por las bajas temperaturas y el aporte continuo de biomasa vegetal (Crosara, 2016). A partir de los 38 cm de profundidad se observó un horizonte grisáceo (10YR 5/1) asociado a procesos de gleyzación, indicando condiciones periódicas

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

Tabla 2. Descripción del perfil en los tres usos de suelo.

Uso Actual	Horizonte	Prof (cm)	Estructura β	Consistencia		Color	Textura al tactoρ	Comentario	Altura (msnm)
				Humedadα	Saturaciónγ				
Zona de conservación	H1	0 - 20	BSA	Fri	MAd,MP	7,5YR 2,5/2	F		2780
	H2	20 - 38	BSA	Fri	Ad,P	10YR 2/1	FL		
	H3	38 - 58	BSA	S	NAd,NP	10YR 5/1	Ar	Horizonte de depositación aluvial de arenas	
	H4	58 - 80	BSA	Fri	Ad,P	10YR 2/1	L	Presencia de Nivel Freático	
Zona de Ganadería	H1	0 – 30	BSA	Fri	Ad,LP	7,5YR 2,5/2	Fa		2796
	H2	30 – 43	BA	Fir	Ad,P	10YR 2/1	FL	Rasgos redoximórficos (7.5 YR 3/6)	
	H3	43 - 97	BSA	FR	LAd,LP	2.5 Y 4/4	FA	Rasgos redoximórficos (2.5 Y 5/4, 5 YR 2/6)	
Zona Agrícola	H1	0 – 9	BSA	Fir	MAd,MP	10 YR 2/2	FAL		2815
	H2	9 – 25	BSA	Fir	MAd,MP	10 YR 3/2	AL		
	H3	25 – 45	BA	Fir	LAd,P	5 Y 4/1	FAa		
	H4	45 – 66	BA	FIR	LAd,P	2.5 Y 5/4	FAa	Rasgos redoximórficos (2.5 Y 5/6)	
	H5	66 – 100 +	BA	Mfir	MAd,MP	2.5 Y 6/2	FAL		

ρ Clase textural al tacto. Ar = arenosa; F = franca; FL = franco limosa; FAa = franco arcillo arenosa; FAL = franco arcillo limosa; L = limo; α Determinada según contenido de agua en campo al momento de la descripción del perfil. S = Suelto; Fri = friable; Fir = firme; Mfir = muy firme; γ Determinada en condiciones de completa saturación. MP = muy plástico; P = plástico; LP = ligeramente plástico; NAd = no adhesivo; LAd = ligeramente adhesivo; Ad = adhesivo; MAd = muy adhesivo.

de saturación hídrica y fluctuación del nivel freático (Dorronsoro, 2016), típicas de los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha.

Zona ganadera

El perfil ganadero también mostró un horizonte superficial oscuro (30 cm de espesor, color negro 10YR 2/1), lo que sugiere una alta acumulación de materia orgánica, posiblemente derivada de las gramíneas y las excretas del ganado. Sin embargo, el rasgo más distintivo fue el cambio abrupto a los 43 cm hacia un horizonte de color marrón oliva (2.5Y 4/4) con abundantes moteados rojizos. Estos rasgos redoximórficos son indicativos de fluctuaciones periódicas del nivel de agua (Soil Survey Staff, 2006). La presencia de un horizonte superficial profundo, pero con evidencia de mal drenaje subsuperficial podría ser una consecuencia de la compactación inducida por el pisoteo del ganado, que reduce la macroporosidad y la conductividad hidráulica en las capas inferiores, llevando a una saturación temporal por encima de la capa compactada (Crosara, 2016).

Zona agrícola

Bajo el uso agrícola, el perfil del suelo mostró la mayor alteración. El horizonte A era notablemente delgado (9 cm), de color marrón muy oscuro (10YR 2/2). La reducción de su espesor en comparación con la zona

de conservación (20 cm) es compatible con una mayor perturbación del horizonte superficial y con procesos de pérdida de suelo favorecidos por la labranza; sin embargo, este rasgo morfológico se interpreta como evidencia complementaria y no como una medición directa de erosión (Quichimbo et al., 2012). Debajo de esta capa, la secuencia de colores hacia tonos más grises y pálidos (5Y 4/1 y 2.5Y 6/2) en profundidad sugiere una menor acumulación de materia orgánica y condiciones de drenaje deficiente. El laboreo periódico puede romper agregados, modificar la distribución de poros y favorecer la formación de capas más densas o compactadas, con potenciales efectos sobre la aireación y el movimiento del agua (Estupiñán et al., 2009). Estas observaciones morfológicas adquieren mayor significado al analizarse conjuntamente con el aumento significativo de la densidad aparente, la pérdida de porosidad y la disminución de materia orgánica registradas en la zona agrícola.

Caracterización fisicoquímica

Comportamiento de la Textura como resultado del cambio de uso.

Los tres usos del suelo presentaron texturas gruesas, clasificadas como areno-franco en la zona de conservación y franco-arenoso en las zonas ganadera y agrícola (Tabla 3). Aunque la textura es una propiedad relativamente estable, el mayor contenido de limo y arcilla observado en los sistemas productivos sugiere procesos de degradación asociados a la pérdida del horizonte superficial por erosión y al consecuente afloramiento de horizontes subsuperficiales más finos (Varón-Ramírez et al., 2022).

Estas diferencias texturales tienen implicaciones funcionales directas. Si bien el mayor contenido de finos en los suelos agrícola y ganadero podría sugerir una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, la condición general arenosa de los tres sistemas los define como suelos con alta permeabilidad. Esto, sumado al uso de fertilizantes y a las excretas del ganado, confirma una alta vulnerabilidad a la lixiviación de nutrientes como nitratos y fosfatos hacia la Laguna de la Cocha, tal como advierten Llambí et al., (2012) para ecosistemas similares.

Comportamiento del pH como resultado del cambio de uso.

Los valores de pH registrados en las tres zonas oscilaron entre 5,1 y 5,3, clasificando los suelos como fuertemente ácidos, condición característica de los Andisoles desarrollados bajo ambientes de alta precipitación y procesos intensos de lixiviación. Sin embargo, el análisis de varianza evidenció un efecto significativo del uso del suelo sobre esta propiedad ($p < 0,05$). La prueba de Tukey mostró que la zona de conservación presentó un pH significativamente mayor que las zonas agrícola y ganadera, mientras que entre estos

Tabla 3. Textura en las tres zonas de estudio.

Uso de suelo	Composición			Textura
	% Arena	*% Limo*	*% Arcilla*	
Zona de conservación	81,8	8,7	9,4	Areno franco
Zona ganadera	67,1	17,4	15,4	Franco arenoso
Zona agrícola	69,8	14,7	15,4	Franco arenoso

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

dos sistemas productivos no se encontraron diferencias estadísticas (Figura 2A).

La ausencia de diferencias entre agricultura y ganadería sugiere que, aunque las prácticas de manejo son distintas, ambas generan procesos de degradación química con efectos similares sobre la acidez del suelo. En contraste, el mayor pH observado en la zona de conservación puede atribuirse a su elevado contenido de materia orgánica, la cual contribuye a la capacidad amortiguadora del suelo y favorece una mayor estabilidad química del sistema (Curtin y Trolove, 2013).

La disminución del pH en los sistemas productivos constituye un indicador de degradación asociado al cambio de uso del suelo. En la zona agrícola, este comportamiento puede relacionarse con la aplicación continua de fertilizantes nitrogenados, cuya nitrificación libera protones (H^+) y favorece la acidificación (Abanto-Rodríguez et al, 2026). De manera similar, en la zona ganadera, la transformación del nitrógeno proveniente de las excretas animales contribuye al mismo proceso. Aunque las diferencias numéricas fueron moderadas, los resultados evidencian una tendencia consistente hacia la acidificación de los suelos intervenidos, asociada a la pérdida de materia orgánica y a la intensificación de las actividades agropecuarias.

Comportamiento de la Materia Orgánica como resultado del cambio de uso.

La materia orgánica (MO) fue la propiedad más afectada por el cambio de uso del suelo. El suelo bajo conservación registró un contenido de 14,6 %, mientras que los sistemas ganadero y agrícola presentaron valores significativamente menores (7,9 % y 5,9 %, respectivamente), equivalentes a pérdidas cercanas al 46 % y 60 % respecto a la condición natural (Figura 2B). El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre la zona de conservación y los usos productivos, aunque no se detectaron diferencias entre agricultura y ganadería.

El elevado contenido de MO en la zona de conservación es característico de los Andisoles de alta montaña, donde las bajas temperaturas, el aporte continuo de biomasa vegetal y la presencia de minerales amorfos derivados de cenizas volcánicas favorecen la acumulación y estabilización del carbono orgánico en el suelo (Burbano-Orjuela, 2016; Mantilla et al., 2018).

La reducción observada en los sistemas productivos evidencia un proceso de degradación asociado al cambio de uso del suelo. En la zona agrícola, la labranza favorece la ruptura de agregados, incrementa la aireación y acelera la mineralización de la materia orgánica, además de reducir el retorno de residuos vegetales al suelo (Brunel y Seguel, 2011; Trutmann, 2002). En la zona ganadera, aunque las excretas aportan carbono y nutrientes, estos ingresos no compensan la pérdida de biomasa original ni los efectos de la compactación sobre los ciclos biogeoquímicos del suelo (Mora et al., 2020).

La disminución de la materia orgánica tiene implicaciones directas sobre la calidad del suelo, ya que reduce su capacidad de retención de nutrientes, estabilidad estructural y capacidad amortiguadora frente a cambios químicos. En consecuencia, los resultados confirman que la transformación de ecosistemas naturales hacia usos agropecuarios constituye uno de los principales factores de pérdida de carbono y deterioro funcional de los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha.

Comportamiento de la Capacidad de intercambio catiónico como resultado del cambio de uso.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) presentó valores elevados en los tres usos del suelo, con un rango entre 48,9 y 58,5 meq/100 g (Figura 2C), característico de los Andisoles ricos en materia orgánica y minerales amorfos derivados de cenizas volcánicas (Intagri, 2021). Aunque se observó una tendencia decreciente desde la zona de conservación hacia los sistemas ganadero y agrícola, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre los usos evaluados ($p > 0,05$).

La disminución numérica de la CIC coincide con la reducción progresiva de la materia orgánica observada en los sistemas productivos, lo que sugiere un efecto del cambio de uso sobre la capacidad de retención de nutrientes. Sin embargo, la ausencia de diferencias significativas indica que, a pesar de la degradación evidenciada en otras propiedades del suelo, los Andisoles aún conservan una elevada capacidad de intercambio debido a la contribución conjunta de la materia orgánica remanente y de los minerales de carga variable presentes en estos suelos (Jordá et al., 2022).

Estos resultados evidencian una cierta resiliencia funcional del sistema edáfico frente al cambio de uso. No obstante, la tendencia descendente observada constituye una señal de alerta, ya que la continua pérdida de materia orgánica podría reducir progresivamente la reserva de fertilidad y comprometer la capacidad del suelo para retener nutrientes a largo plazo (Lagos y Huertas, 2019).

Comportamiento de la Conductividad eléctrica como resultado del cambio de uso.

La conductividad eléctrica (CE) presentó diferencias significativas entre los usos del suelo ($p < 0,05$), aunque todos los valores se mantuvieron dentro del rango de suelos no salinos (<2000 µS/cm) (Figura 2D). La zona ganadera registró la mayor CE (145,5 µS/cm), seguida por la zona de conservación (100,1 µS/cm) y la agrícola (76,3 µS/cm). El mayor valor observado en la zona ganadera puede atribuirse al aporte de sales solubles provenientes de las excretas animales, mientras que los menores valores en la zona agrícola podrían estar asociados a procesos de lixiviación y extracción de nutrientes por los cultivos. En general, los resultados indican que el cambio de uso del suelo genera variaciones en la concentración de sales solubles, aunque sin evidencias de procesos de salinización ni de afectaciones significativas a la calidad química del suelo.

Comportamiento de la Humedad como resultado del cambio de uso.

El contenido de humedad presentó diferencias significativas entre los usos del suelo ($p < 0,05$), registrándose el valor más alto en la zona agrícola (54,8 %), seguido por la zona ganadera (49,5 %) y la zona de conservación (41,1 %) (Figura 2E). Aunque podría esperarse una mayor humedad en el suelo de conservación debido a su elevado contenido de materia orgánica, los resultados evidencian una dinámica distinta asociada al estado estructural del suelo (Chen et al., 2023).

La menor humedad observada en la zona de conservación refleja una condición de drenaje adecuada, favorecida por la alta porosidad y estabilidad estructural características de los Andisoles poco intervenidos. Por el contrario, el incremento de humedad en los sistemas productivos, especialmente en la zona agrícola, sugiere una disminución de la capacidad de infiltración y percolación del agua como consecuencia de la compactación y la alteración de la estructura del suelo (Jakab et al., 2023; B.-Y. Zhang et al., 2025).

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

Estos resultados indican que el aumento del contenido de humedad en las zonas intervenidas no representa una mejora en la capacidad de almacenamiento hídrico, sino una evidencia de degradación física asociada al cambio de uso del suelo. La acumulación de agua en los horizontes superficiales coincide con los procesos de compactación, reducción de la porosidad y drenaje deficiente identificados en el análisis morfológico y en las demás propiedades físicas evaluadas.

Comportamiento de la Densidad aparente como resultado del cambio de uso.

La densidad aparente evidenció uno de los efectos más marcados del cambio de uso del suelo sobre la estructura edáfica. El suelo de conservación presentó el valor más bajo (0,30 g/cm³), mientras que la densidad aumentó significativamente en la zona ganadera (0,51 g/cm³) y alcanzó su máximo en la zona agrícola (0,67 g/cm³). El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los tres usos evaluados ($p < 0,05$), evidenciando un gradiente progresivo de compactación asociado a la intensidad de intervención (Figura 2F).

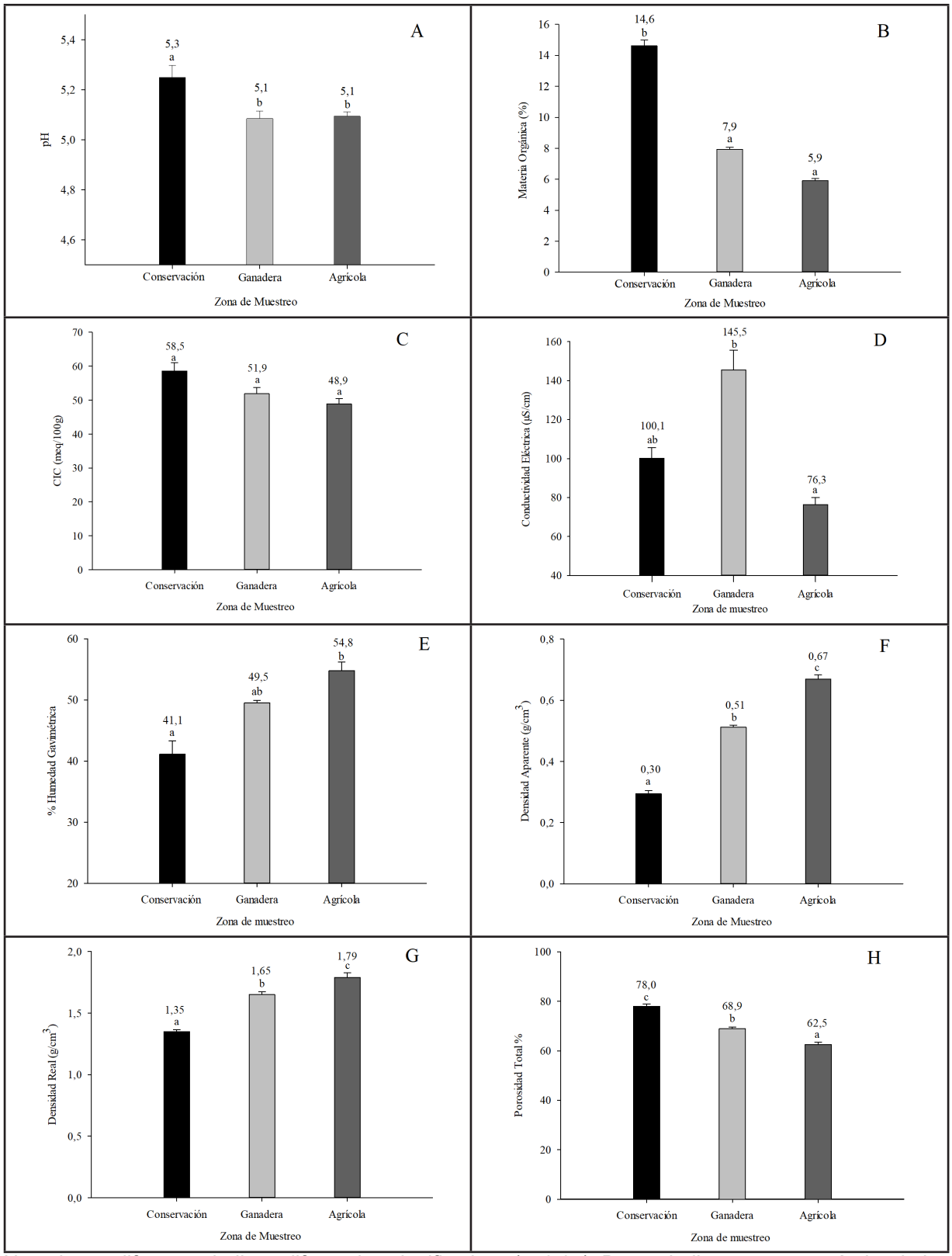
El bajo valor registrado en la zona de conservación es característico de Andisoles poco perturbados, donde el elevado contenido de materia orgánica favorece una estructura estable y altamente porosa (Zúñiga et al., 2018). Por el contrario, el incremento observado en la zona ganadera puede atribuirse al efecto del pisoteo animal, que reduce la macroporosidad y favorece la compactación del suelo (Dörner et al., 2023). La mayor densidad aparente registrada en la zona agrícola refleja un estado más avanzado de degradación física, asociado a la pérdida de materia orgánica y a la alteración de la estructura del suelo por las labores de preparación y manejo del cultivo (Jiménez y Khalajabadi, 2005). Este comportamiento coincide con los mayores contenidos de humedad y la menor porosidad observados en este sistema, evidenciando una reducción de la capacidad de infiltración y drenaje del suelo.

La magnitud del cambio es particularmente relevante al considerar la naturaleza volcánica del suelo. Respecto a la zona de conservación (0,30 g/cm³), la densidad aparente aumentó aproximadamente 70 % bajo ganadería (0,51 g/cm³) y 123 % bajo agricultura (0,67 g/cm³), con diferencias estadísticas entre los tres usos. Por tanto, la interpretación no debe basarse en comparar estos valores con umbrales genéricos de suelos minerales, sino en el desplazamiento respecto a la condición de referencia del propio Andisol. Dörner et al., (2023) y Dörner et al., (2022) demostraron experimentalmente en un Andosol que incrementos de densidad aparente desde 0,64 hasta 0,82 Mg/m³, aun manteniéndose por debajo de 0,9 Mg/m³, estuvieron acompañados por disminución de poros gruesos y permeabilidad al aire e incremento de la resistencia a la penetración y del esfuerzo de precompresión. En consecuencia, un valor absoluto de densidad aparente aparentemente bajo no excluye compactación ni degradación física en suelos derivados de cenizas volcánicas.

Comportamiento de la Densidad real como resultado del cambio de uso.

La densidad real presentó diferencias significativas entre los usos del suelo ($p<0,05$), aumentando desde 1,35 g/cm³ en la zona de conservación hasta 1,65 g/cm³ y 1,79 g/cm³ en las zonas ganadera y agrícola, respectivamente (Figura 2G). Este comportamiento refleja la disminución progresiva del contenido de MO en los sistemas productivos, ya que la fracción orgánica posee una densidad menor que la fracción mineral del suelo (Ruehlmann, 2020). En consecuencia, el incremento de la densidad real constituye una evidencia adicional de la pérdida de carbono orgánico asociada al cambio de uso del suelo.

Figura 2. Comportamiento del suelo en las tres zonas de estudio.



Nota: letras diferentes indican diferencias significativas (p≤0.05). Barras indican ± error estándar de los datos.

Comportamiento de la Porosidad total como resultado del cambio de uso.

La porosidad total disminuyó significativamente con la intensificación del uso del suelo ($p<0,05$), pasando de 78,0 % en la zona de conservación a 68,9 % y 62,5 % en las zonas ganadera y agrícola, respectivamente (Figura 2H). Los tres usos presentaron diferencias estadísticas significativas, evidenciando un gradiente progresivo de degradación física.
La elevada porosidad observada en la zona de conservación está relacionada con el alto contenido de MO y la estabilidad estructural característica de los Andisoles de alta montaña (Llambí et al., 2012). La pérdida de porosidad observada en los sistemas intervenidos coincide con el incremento de la densidad aparente y los mayores contenidos de humedad registrados, confirmando un deterioro de la estructura del suelo que puede afectar procesos como la infiltración, el drenaje y el desarrollo radicular (González et al., 2012; Daza et al., 2014).

La elevada porosidad total observada en los tres usos corresponde a una característica propia de los Andisoles; en consecuencia, su magnitud absoluta no debe interpretarse como indicadora de ausencia de compactación. Lo relevante es la disminución significativa desde 78,0 % en conservación hasta 68,9 % en ganadería y 62,5 % en agricultura, equivalente a una pérdida relativa cercana al 20 % entre conservación y agricultura. Dörner et al., (2023) y observaron un patrón comparable: el aumento de densidad aparente por compactación redujo la porosidad total de 72 a 63 %, pero, de manera más importante, disminuyó el volumen de poros gruesos y la permeabilidad al aire. Esto indica que la degradación puede expresarse primero como una pérdida de la funcionalidad del sistema poroso, aun cuando la porosidad total permanezca numéricamente alta (Dörner et al., 2022). En este estudio no se midieron infiltración, conductividad hidráulica ni estabilidad de agregados; por ello, no se afirma una cuantificación directa de estos procesos. Sin embargo, la convergencia entre mayor densidad aparente, menor porosidad total, mayor humedad superficial, pérdida de materia orgánica y rasgos de drenaje deficiente constituye evidencia consistente de degradación física asociada al uso del suelo.

Índice dC/dB y fragilidad asociada al uso del suelo.

El índice dC/dB mostró un gradiente marcado entre usos: 0,64 en conservación, 0,20 en ganadería y 0,12 en agricultura. Paralelamente, el carbono orgánico disminuyó de 8,46 % en conservación a 4,58 % y 3,42 % en ganadería y agricultura, respectivamente, mientras que la densidad aparente aumentó de 0,30 a 0,51 y 0,67 g/cm³. En conjunto, el dC/dB disminuyó 68,8 % bajo ganadería y 81,3 % bajo agricultura respecto a la referencia de conservación, evidenciando una reducción progresiva del margen funcional del suelo frente a la intensificación del uso.

Tabla 4. Carbono orgánico, densidad aparente e índice dC/dB según uso del suelo.

Uso del suelo	CO (%)	Da (g/cm³)	dC/dB
Zona de conservación	8,468	0,30	0,64
Zona ganadera	4,582	0,51	0,20
Zona agrícola	3,422	0,67	0,12

El valor de 0,12 registrado en el suelo agrícola debe interpretarse como una señal de alta fragilidad y no como una demostración directa de irreversibilidad. La propuesta conceptual de Clunes et al., (2022) establecen que la fragilidad aumenta a medida que el suelo pierde capacidad de resiliencia frente a las presiones antrópicas, mientras que la implementación posterior del índice dC/dB en suelos volcánicos ha identificado valores bajos (≤0,10–0,12, según la región evaluada) en condiciones frágiles que requieren protección para evitar aproximarse al punto de no retorno (Zúñiga et al., 2025). Aunque estos umbrales deben validarse localmente antes de adoptarse como límites universales, la coincidencia del valor obtenido para el suelo agrícola con dicho intervalo, junto con la pérdida del 60 % de materia orgánica, el incremento del 123 % en la densidad aparente y la reducción de la porosidad, evidencia que este uso presenta el menor margen de resiliencia y la mayor vulnerabilidad frente a una degradación difícil de revertir si continúa el sobreuso. Estos resultados adquieren especial relevancia en el contexto del objetivo central de este estudio, orientado a determinar si las actividades socioeconómicas desarrolladas en la zona ribereña están afectando las propiedades del suelo y, consecuentemente, su capacidad para sostener funciones y servicios ecosistémicos esenciales.

En particular, la pérdida de materia orgánica y carbono compromete la función del suelo como reservorio de carbono, mientras que el incremento de la densidad aparente, la reducción de la porosidad y las alteraciones en el contenido de humedad evidencian cambios estructurales que pueden afectar la infiltración, el almacenamiento y la circulación del agua en el perfil (Beillouin et al., 2023). Por tanto, la degradación observada no representa únicamente una modificación de propiedades fisicoquímicas aisladas, sino una pérdida progresiva de la capacidad funcional del suelo para contribuir a la regulación hidrológica y al almacenamiento de carbono. Esta condición resulta especialmente preocupante en los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha, donde dichas funciones son fundamentales para regular los flujos de agua, sedimentos y nutrientes hacia el humedal y para mantener la integridad ecológica de un ecosistema de importancia internacional. En este sentido, la elevada fragilidad identificada en el suelo agrícola constituye una señal de alerta frente a la intensificación de las actividades productivas que posteriormente se evidencian en el análisis socioeconómico y espacial del territorio.

Relación de las actividades socioeconómicas y el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas

Los ecosistemas ribereños en la vereda El Motilón han sido intervenidos por la población a causa del desarrollo de diferentes actividades productivas como ganadería no intensiva y agricultura con cultivos de papa, cebolla, mora, repollo, acelga, tomate y otras especies, debido al crecimiento poblacional, las comunidades requieren mayores ingresos y recursos que han llevado a la invasión de las zonas de conservación ubicadas en la ribera de la laguna de La Cocha (Martínez y Narváez, 2017).

En relación a lo anterior estos análisis revelan un profundo proceso de transformación del paisaje en la vereda El Motilón, impulsado por la expansión de las actividades socioeconómicas como se puede observar en la Figura 3.

En 2002, el paisaje aún conservaba áreas significativas de ecosistemas naturales, con una notable cobertura de "Bosque denso alto de tierra firme" y "Arbustal abierto" que dominaban las partes altas y medias de la vereda. La actividad humana se concentraba

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

en un "Mosaico de pastos y cultivos" a lo largo de la ribera de la laguna.

Para el año 2020, este escenario cambió drásticamente. Las áreas de bosque denso y arbustal se vieron severamente reducidas y fragmentadas, siendo reemplazadas por "Vegetación secundaria" y de forma notable, por "Pastos limpios". Esto evidencia un claro proceso de deforestación y expansión de la frontera ganadera hacia zonas de mayor pendiente. Simultáneamente, el área ribereña muestra una intensificación del uso del suelo, con una mayor especialización y una clara dominancia de los sistemas agropecuarios sobre los remanentes de vegetación natural.

La transformación del paisaje en la vereda El Motilón, evidenciada por la pérdida significativa de cobertura forestal y la intensificación de las actividades agrícolas y pecuarias en las últimas dos décadas, constituye el principal factor causal de los procesos de degradación del suelo observados en este estudio. La reducción superior al 50% en los contenidos de materia orgánica, el incremento de más del 120% en la compactación del suelo, así como las alteraciones en el pH y en el régimen hídrico, representan indicadores medibles y directamente asociados al cambio en el uso y manejo del territorio. Por lo tanto, los resultados fisicoquímicos deben entenderse como la "huella edáfica" de las presiones socioeconómicas que han remodelado el ecosistema de la vereda El Motilón en el período analizado y que puede ser el reflejo de lo que puede estar sucediendo en la rivera de toda la laguna de La Cocha en donde se realizan este tipo de actividades.

Por consiguiente, el desconocimiento del funcionamiento y la importancia de estos ecosistemas es una de las causas de la introducción de prácticas agrícolas que se desarrollan en zonas cercanas a la laguna, provocando cambios ambientales y modificación del paisaje. La zona ribereña enfrenta problemas ambientales dentro de los cuales se encuentra la presión de la tierra por fragmentación y desestabilización de la agricultura campesina y la ganaderización que conducen a la degradación del funcionamiento original y la provisión de beneficios ambientales (Corponariño, 2007).

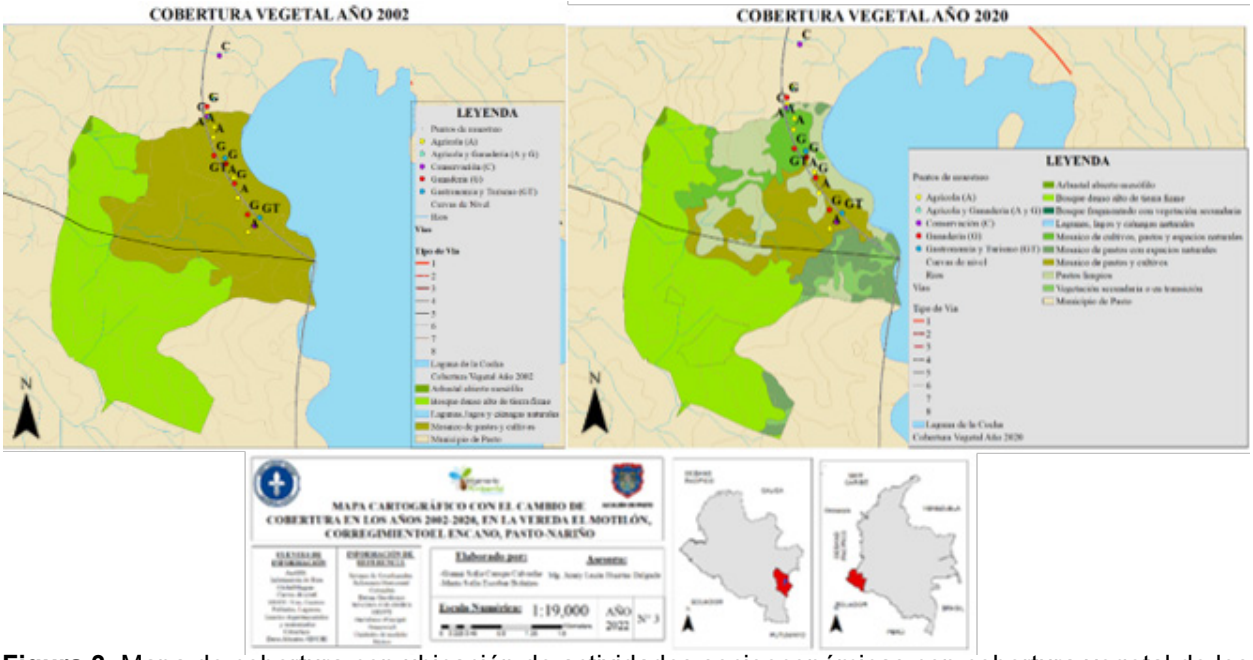


Figura 3. Mapa de cobertura con ubicación de actividades socioeconómicas con cobertura vegetal de los años 2002 y 2020. **Fuente de consulta:** datos tomados del SINCHI.

En la Figura 3, se observa que los puntos de las actividades socioeconómicas que se realizan en la zona, se ubican sobre el uso o vocación de “Zona de Agricultura Sostenible”, por lo que se puede inferir que el uso actual no se desempeña de manera adecuada ya que las actividades que se desarrollan en las zonas ribereñas principalmente las prácticas agrícolas no son ecológicas y no se respeta el recurso suelo, aire y agua, de la misma manera se afecta los derechos y la salud de los agricultores (Earth Observing System, 2021).

Conflicto de uso del Suelo.

El análisis de la planificación territorial oficial añade una capa final y crítica para la comprensión de la degradación del suelo en la vereda El Motilón. Al superponer los usos actuales del suelo sobre el mapa de zonificación del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio de Pasto (2015), emergen un claro y severo conflicto de uso del suelo (Figura 4).

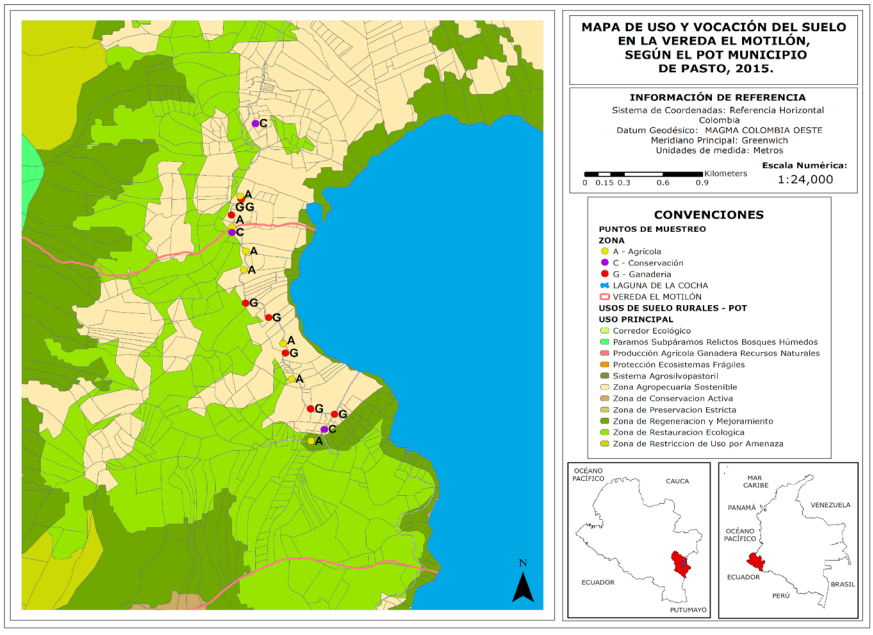


Figura 4. Mapa de uso y vocación del suelo en la vereda El Motilón, según el POT Municipio de Pasto, 2015.

El primer y más profundo conflicto reside en la brecha entre la norma y la práctica. La franja ribereña, donde se concentran las actividades agrícolas y ganaderas, está zonificada como "Zona Agropecuaria Sostenible". El término "sostenible" implica un manejo que mantiene o mejora la salud del suelo a largo plazo, asegurando su productividad y sus funciones ecológicas (Aldaz Lusarreta, 2024). Sin embargo, los resultados de este estudio demuestran precisamente lo contrario. Las prácticas actuales son insostenibles, ya que están degradando activamente la base de recursos naturales que el propio POT busca proteger.

El segundo conflicto se evidencia al comparar el POT con la dinámica de cambio de cobertura 2002-2020. Se observa una clara presión de la frontera agropecuaria que se expande desde la "Zona Agropecuaria Sostenible" hacia las zonas adyacentes de "Preservación Estricta" y "Corredor Ecológico". Esto indica que no solo las prácticas dentro del área permitida son inadecuadas, sino que además se están invadiendo y degradando las áreas de máxima protección.

Por lo tanto, la degradación del suelo en la vereda El Motilón es la consecuencia directa

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 99-116. https://doi.org/10.47864/se542024p99116

de este doble conflicto: (i) la falta de adopción de prácticas verdaderamente sostenibles en las áreas designadas para ello, y (ii) el incumplimiento de los límites de las zonas de conservación.

CONCLUSIONES

Las actividades agrícolas y ganaderas desarrolladas en las zonas ribereñas de la Laguna de La Cocha modificaron significativamente las propiedades fisicoquímicas del suelo respecto a la condición de conservación. La disminución del pH, la materia orgánica y la porosidad, junto con el incremento de la densidad aparente y de la humedad, evidenció un gradiente de alteración asociado con la intensidad de uso. La agricultura presentó la condición más afectada, mientras que la ganadería mostró un nivel intermedio de degradación, relacionado principalmente con procesos de compactación y alteración de la estructura del suelo.

La incorporación del concepto de fragilidad permitió interpretar estos cambios desde una perspectiva funcional. La disminución del índice dC/dB desde 0,64 en conservación hasta 0,20 en ganadería y 0,12 en agricultura evidencia una reducción progresiva del margen de resiliencia del suelo frente a las presiones antrópicas. El sistema agrícola presentó la condición de mayor fragilidad, lo que indica una menor capacidad de recuperación ante la continuidad o intensificación del sobreuso y una posible aproximación a condiciones de difícil reversibilidad. No obstante, los umbrales asociados con un eventual punto de no retorno deben ser validados para las condiciones locales antes de considerarse límites absolutos.

El análisis multitemporal evidenció una expansión progresiva de las actividades agropecuarias sobre coberturas naturales entre 2002 y 2020, particularmente mediante el aumento de pastos y áreas productivas. Esta transformación espacial coincide con los patrones de alteración observados en las propiedades del suelo y revela un conflicto entre el uso actual del territorio, las zonas destinadas a agricultura sostenible y las áreas de preservación y conectividad ecológica establecidas en la planificación territorial.

El gradiente observado en el índice dC/dB, junto con la pérdida de materia orgánica, el incremento de la densidad aparente y la reducción de la porosidad, evidencia que la intensificación de las actividades socioeconómicas no solo modifica propiedades fisicoquímicas individuales, sino que disminuye progresivamente la resiliencia y funcionalidad del suelo. Estas alteraciones pueden comprometer servicios ecosistémicos fundamentales, particularmente la regulación hidrológica y el almacenamiento de carbono, esenciales en los suelos ribereños de la Laguna de La Cocha por su papel en la regulación de los flujos de agua, sedimentos y nutrientes hacia el humedal. En este contexto, la elevada fragilidad identificada en el suelo agrícola constituye una señal de alerta que justifica el fortalecimiento de estrategias de manejo sostenible, restauración ecológica y ordenamiento territorial orientadas a conservar la integridad funcional de este ecosistema de importancia internacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Mariana y al Programa de Ingeniería Ambiental por el apoyo académico y logístico brindado durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, expresan su gratitud al laboratorio de la sede Alvernia por facilitar los espacios, equipos y materiales requeridos para los análisis fisicoquímicos del suelo. Se agradece también a la comunidad de la vereda El Motilón, corregimiento de El Encano, por permitir el acceso a las áreas de muestreo.

REFERENCIAS

Abanto-Rodríguez, C., Guerra Blas, J. C., del Castillo Torres, D., Ramírez-Flores, N., García Soria, D. G., Moya Ambrosio, M. F., Arévalo, H. G., Arévalo, W. F. G., Bravo Nieto, J. A., Panduro Tenazoa, N. M., Sakasaki, R. T., Monteiro Neto, J. L. L., Revilla-Chávez, J. M., & Murga-Orrillo, H. (2026). Soil functioning indicators decline with land-use intensification in the Peruvian Amazon: Evidence from Ucayali. Frontiers in Soil Science, 6, 1741629. https://doi.org/10.3389/fsoil.2026.1741629

Aldaz Lusarreta, A. (2024). Hacia un manejo sostenible del recurso agua-suelo: Evaluación de sensores de potencial hídrico y de una innovadora gestión del suelo y cultivo en Navarra. https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/50273

Brunel, N., & Seguel, O. (2011). EFECTOS DE LA EROSIÓN EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO. Agro Sur, 39(1), Article 1. https://doi.org/10.4206/agrosur.2011.v39n1-01

Burbano-Orjuela, H. (2016). The soil and its relationship with ecosystem services and food security. Revista de Ciencias Agrícolas, 33(2), 117-124. https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58

Chen, Y., Liu, X., Ma, Y., He, J., He, Y., Zheng, C., Gao, W., & Ma, C. (2023). Variability analysis and the conservation capacity of soil water storage under different vegetation types in arid regions. CATENA, 230, 107269. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107269

Corponariño. (2007). TOMO I Introducción, Descripción General, Marco Conceptual Y Metodológico: Proyecto Estado del Arte de la Información Biofísica y Socioeconómica de los Páramos de Nariño. https://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/biodiversidad/tomo01introducion.pdf

Crosara, A. 2016. «Color de Suelo».

Curtin, D., & Trolove, S. (2013). Predicting pH buffering capacity of New Zealand soils from organic matter content and mineral characteristics. Soil Research, 51(6), 494-502.

Daza, M., Flórez, F., & Triana, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz—Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía, 67, 7189-7200. https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642

Dörner, J., Bravo, S., Clunes, J., Horn, R., Dec, D., Valle, S., Zuñiga, F., Wendroth, O., & Werth, J. (2023). Assessing Temporal Changes of the Soil Mechanical Strength of a Volcanic Ash Soil at Different Bulk Densities Under Pasture. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23(2), 2007-2017. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01155-0

Dorronsoro, C. 2016. Introducción a la Edafología. El suelo y sus propiedades. Universidad de Granada, España.

Earth Observing System. (2021, abril 23). Agricultura Intensiva: Características Y Posibles Soluciones. Agricultura. https://eos.com/es/blog/agricultura-intensiva/

Estupiñán, LH, Gómez, JE, … Limas, LF (2009). Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el Páramo el Granizo, (Cundinamarca - Colombia). Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 12 (2). https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n2.2009.694

González, J. L., González, G., & Chávez, E. (2012). Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas. Tecnología y ciencias del agua, 3(1), 21-32.

IGAC. 2017. «Recomendaciones para la toma de muestras para análisis del laboratorio nacional de suelos».

Intagri. (2021). La Capacidad de Intercambio Catiónico del Suelo. Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura. https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-capacidad-de-intercambio-cationico-del-suelo

Jakab, G., Madarász, B., Masoudi, M., Karlik, M., Király, C., Zacháry, D., Filep, T., Dekemati, I., Centeri, C., Al-Graiti, T., & Szalai, Z. (2023). Soil organic matter gain by reduced tillage intensity: Storage, pools, and chemical composition. Soil and Tillage Research, 226, 105584. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105584

Jiménez, A. S., & Khalajabadi, S. S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. 17.

Jordá, J. D., Tent-Manclús, J. E., Cerdán, M., Sánchez-Sánchez, A., Jaramillo, P., & Jordán, M. M. (2022). Characterisation of clays from Alicante province (SE Spain) for use in the recovery of degraded soils. Environmental Geochemistry and Health, 44(1), 247-255. https://doi.org/10.1007/s10653-021-00925-y

Lagos, J., & Huertas, J. (2019). Efectos de una enmienda orgánica sobre las propiedades fisicoquímicas de un Andisol, en Túquerres, Nariño, Colombia. Agro Sur, 47(3), 39-54. https://doi.org/10.4206/agrosur.2019.v47n3-05

Llambí, L. D., Célleri, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., Borja, P., & Soto-Werschitz, I. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos: Páramos andinos. Proyecto Páramo Andino, FONAG y USAID.

López Martínez, Mery Liliana, & Madroñero Palacios, Sandra Milena. (2015). ESTADO TRÓFICO DE UN LAGO TROPICAL DE ALTA MONTAÑA: CASO LAGUNA DE LA COCHA. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 25(2), 21-42. https://doi.org/10.15665/re.v13i1.348

Mantilla, G., De la Torre, L., Gómez, C., Ordoñez, N., Ceballos, J., Euscátegui, C., Perez, S., Martínez, N., Sánchez, R., Maldonado, N., Gaitán, J., Chávez, L., Chamorro, C., & Flórez, A. (2018). Los Suelos: Estabilidad, productividad y degradación. En El Medio Ambiente en Colombia (pp. 229-277).

Martínez, E. A., & Narváez, N. O. (2017). Apropiación social de una tecnología no convencional para el tratamiento del agua en la vivienda, vereda el Motilón, Pasto (Nariño). https://hdl.handle.net/11059/7923

Mora, M., Pescador, L., Ramos, L., & Charry, J. (2020). Impacto De La Actividad Ganadera Sobre El Suelo En Colombia. StuDocu. https://www.studocu.com/co/document/universidad-nacional-de-colombia/ecologia/dialnet-impacto-de-la-actividad-ganadera-sobre-el-suelo-en-colombia-6098075/8949336

Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. Suelos Ecuatoriales, 42(2), 138-153.

Romero-Ruiz, A., Monaghan, R., Milne, A., Coleman, K., Cardenas, L., Segura, C., & Whitmore, A. P. (2023). Modelling changes in soil structure caused by livestock treading. Geoderma, 431, 116331. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116331

Ruehlmann, J. (2020). Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 1. Partitioning of SOM in conceptional fractions and derivation of a variable SOC to SOM conversion factor. Geoderma, 375, 114542. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114542

Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. L., Flores, H., & Neaman, A. (2006). Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006 (Serie Actas INIA N.° 34). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., USA. 341 p.

Trutmann, P. (2002). Guia Salud de Suelos: Un manual para cuidar el salud de los suelos para Promotores, Productores y Extensionistas. John Reily, Alfredo Rueda and Peter Trutmann Eds. 2002. Cornell University, Ithaca NY. USA. A guide for 'promotores' by Cornell University, Zamorano faculty and NGOs working in the field.Publisher,Orton.catie.ac.c. https://www.academia.edu/2241008/Guia_Salud_de_Suelos_Un_manual_para_cuidar_el_salud_de_los_suelos_para_Promotores_Productores_y_Extensionistas

Varón-Ramírez, V. M., Araujo-Carrillo, G. A., & Guevara Santamaría, M. A. (2022). Colombian soil texture: Building a spatial ensemble model. Earth System Science Data, 14(10), 4719-4741. https://doi.org/10.5194/essd-14-4719-2022

Zhang, B.-Y., Dou, S., Guo, D., & Guan, S. (2025). Reduced soil water repellency suggests the need for timely replenishment of soil organic matter in long-term traditional farming. Soil and Tillage Research, 247, 106381. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106381

Zúñiga Ugalde, F., Huertas Delgado, J., Guerrero Obando, G., Dörner Fernández, J., Sarasty Bravo, J., & Burbano Orjuela, H. (2018). Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia. REVISTA TERRA LATINOAMERICANA, 36(2), 183. https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.363