

Artículo original

## Contenido de nutrientes, acidez y textura del suelo en áreas degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico

### Nutrient content, acidity, and soil texture in areas degraded by mining in the biogeographic Chocó

Harley Quinto-Mosquera<sup>1,\*</sup>, Gentil Ayala-Vivas<sup>2</sup>, Harry Gutiérrez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luis Córdoba”, Quibdó, Colombia

<sup>2</sup> Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías, Universidad Tecnológica del Chocó Diego Luis Córdoba, Quibdó, Colombia

#### Resumen

La minería es una de las actividades económicas que más destruyen ecosistemas en el Chocó biogeográfico, por lo que se requiere conocer los efectos que esta tiene en las condiciones fisicoquímicas del suelo con miras a su restauración. En ese contexto el objetivo del presente estudio fue evaluar los cambios en las condiciones edáficas de áreas degradadas por la minería a cielo abierto con diferente edad sucesional en la región. Para ello se establecieron cinco parcelas permanentes de 625 y 2.500 m<sup>2</sup> en áreas con 15 y 30 años de recuperación, respectivamente. Posteriormente, se tomaron muestras compuestas de suelos a 20 cm de profundidad y se determinaron sus contenidos de nutrientes, pH y textura. Se observó que los suelos eran ácidos (pH=4,73), con altos porcentajes de arena, materia orgánica (6,62 %), nitrógeno (N) total (0,34 %), fósforo (P) disponible (28,21 ppm), potasio (K) (0,38 meq/100g) y aluminio (Al) (2,15 meq/100 g), pero con bajas cantidades de calcio (Ca) (2,28 meq/100 g) y magnesio (Mg) (1,37 meq/100 g). La disponibilidad de P y K fue alta en ambas edades sucesionales, en tanto que la materia orgánica, el N total, el Ca, el Mg, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), el Al, y el porcentaje de arena incrementaron con la sucesión, aunque el pH y la arcilla, disminuyeron. En síntesis, se evidenció un incremento en la disponibilidad de arena y nutrientes, pero también un aumento en la acidez y la toxicidad del Al con la sucesión. Asimismo, se constató que la recuperación de las condiciones fisicoquímicas del suelo en minas está condicionada por el efecto de la materia orgánica y la vegetación.

**Palabras claves:** Fertilidad edáfica; Limitación de nutrientes; Minería; Porcentaje de arena; Restauración; Suelos tropicales.

#### Abstract

Mining is one of the economic activities that most destroy ecosystems in the biogeographic Chocó. Therefore, it is necessary to know the effects of mining on the physicochemical conditions of the soil with a view to its restoration. In this context, in the present study, we evaluated the changes in the edaphic conditions of areas degraded by mining with different successional ages in the region. For this, five permanent plots of 625 and 2,500 m<sup>2</sup> were established in the areas with 15 and 30 years of recovery, respectively. Subsequently, composite soil samples were taken at a depth of 20 cm to determine their nutrient contents, pH, and texture. We found that the soils were acidic (pH = 4.73), with a high percentage of sand, organic matter (OM) (6.62%), total N (0.34%), available P (28.21 ppm), K (0.38 meq/100 g), and Al (2.15 meq/100 g) but with low amounts of Ca (2.28 meq/100g) and Mg (1.37 meq/100 g). Furthermore, the availabilities of P and K were high in both successional ages whereas the OM, total N, Ca, Mg, effective cation exchange capacity (ECEC), Al, and the percentage of sand increased with the succession while the pH and the clay decreased. In summary, an increase in the availability of sand and nutrients was evidenced but also an increase in acidity and Al toxicity with the succession. Likewise, we confirmed that the recovery of the physicochemical conditions of the soil in mines is conditioned by the effect of organic matter and vegetation.

**Keywords:** Edaphic fertility; Nutrient limitation; Mining; Percentage of sand; Restoration; Tropical soils.

**Citación:** Quinto-Mosquera H, Ayala-Vivas G, Gutiérrez H. Contenido de nutrientes, acidez y textura del suelo en áreas degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):514-528, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1615>

**Editor:** Carlos Alberto Jaramillo Muñoz

**\*Correspondencia:**

Harley Quinto-Mosquera;  
d-harley.quinto@utch.edu.co

**Recibido:** 16 de diciembre de 2021

**Aceptado:** 27 de mayo de 2022

**Publicado:** 28 de junio de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## Introducción

En un reciente análisis de las Naciones Unidas sobre el estado de los bosques del mundo, se concluía que la deforestación y la degradación forestal siguen avanzando a un ritmo alarmante (FAO & PNUMA, 2020) y se estimaba que entre el 2015 y el 2020 la tasa promedio de deforestación había sido de 10 millones de hectáreas al año, con la consecuente pérdida de biodiversidad y degradación de ecosistemas (FAO & PNUMA, 2020). Esta tasa de deforestación se considera la principal responsable de la degradación y pérdida de hábitat en las regiones tropicales y como la causa más importante de extinción de especies (Meffe *et al.*, 1994; Groom & Vynne, 2006). Se concluye que la agricultura, la ganadería, la expansión urbana, la tala de árboles y la minería son las principales responsables de la deforestación de bosques tropicales (FAO & PNUMA, 2020).

La minería, en particular, es una de las actividades económicas más degradantes de los ecosistemas naturales (Environmental Law Alliance Worldwide-ELAW, 2010), y afecta de forma importante el funcionamiento del suelo. El suelo residual de las actividades de minería se caracteriza por tener muy baja fertilidad y texturas gruesas, con muy poco contenido de humedad y bajas proporciones de limo, arcillas y materia orgánica debido al proceso de arrastre y deposición hídrica (Chacón, 1992). Asimismo, dado que el suelo queda totalmente expuesto, los nutrientes se pierden fácilmente por lixiviación (ELAW, 2010), situación que acentúa la infertilidad edáfica, dificulta la recuperación vegetal y obstaculiza la restauración ecológica (Holl, 2002; Chazdon, 2003; Pallavicini *et al.*, 2015). En las áreas afectadas por esta actividad se genera un mosaico de comunidades vegetales en distintas edades sucesionales diferenciadas según el tiempo e intensidad de la perturbación (Díaz & Elcoro, 2009).

Para la restauración de las áreas degradadas por la minería es necesario conocer previamente los factores ambientales y biológicos que limitan su sucesión y recuperación (Holl, 2002; Walker *et al.*, 2007; Pallavicini *et al.*, 2015). En tal sentido, Holl (2002) menciona que la recuperación de bosques degradados está determinada principalmente por factores como la vegetación remanente, el microclima, las micorrizas, y las propiedades fisicoquímicas del suelo (Holl, 2002). Específicamente el tipo de suelo, la textura, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes tienen un efecto fundamental en la revegetación de dichas áreas (Holl, 2002; Chazdon, 2003; Walker & del Moral, 2008). Holl (1999) también señaló que el cambio de uso del suelo genera alteraciones en los contenidos edáficos de nutrientes en bosques tropicales, con lo cual se afecta la recuperación de los ecosistemas previamente degradados.

En un análisis realizado hace algunas décadas, Guariguata & Ostertag (2001) reportaron que, después de la pérdida de la cobertura boscosa en los trópicos, se presentan cambios en las condiciones fisicoquímicas del suelo difíciles de generalizar. En tal sentido, se ha observado que la densidad del suelo, el P disponible y la CICE incrementan, en tanto que la porosidad, la materia orgánica, el N total, la biomasa microbiana, y el Al extraíble disminuyen. Por su parte, el pH, el amonio, el nitrato, el Ca, el Mg y el K muestran, en algunos casos, incrementos pero en otros, disminuciones, en tanto que a veces no cambian significativamente, por lo que es complejo generalizar (Werner, 1984; Guariguata & Ostertag, 2001). En síntesis, en los procesos sucesionales las condiciones edáficas, en especial los nutrientes, pueden cambiar con el tiempo, cambios que dependen en gran medida de los tipos de suelos, bosques y perturbaciones, cuya intensidad y tipo constituyen algunos de los factores más preponderantes (Guariguata & Ostertag, 2001), como sucede en los suelos de las áreas previamente degradadas por la minería.

Se ha planteado la hipótesis de que en suelos tropicales en las edades sucesionales iniciales hay una limitación de N debido a su poca fijación biológica y la escasez de plantas leguminosas (Walker, 1993; Davidson *et al.*, 2004). Sin embargo, en la medida en que se presenta una mayor colonización de plantas fijadoras de N y avanza la sucesión, se reduce tal limitación (Cleveland *et al.*, 1999; Walker & del Moral, 2008). A diferencia del N, algunos estudios muestran que los niveles de P en el suelo tienden a ser altos en

los primeros estadios sucesionales y, con el paso del tiempo, disminuye su disponibilidad edáfica, convirtiéndose en una limitación en el ecosistema (Vitousek *et al.*, 2010) debido a las pérdidas por lixiviación e inmovilización en óxidos de hierro (Fe) y Al, especialmente en suelos arcillosos tropicales de baja altitud (Walker & Syers, 1976; Vitousek *et al.*, 1993; Reed *et al.*, 2011), lo cual evidencia una posible relación inversamente proporcional entre la disponibilidad edáfica del P y del N total a lo largo del tiempo de sucesión.

Experimentalmente, Vitousek *et al.* (1993) corroboraron la limitación del crecimiento vegetal por la disponibilidad de N en etapas tempranas de la sucesión primaria, en tanto que el P fue el nutriente limitante en etapas tardías (Vitousek *et al.*, 1993). Sin embargo, los estudios realizados por Li *et al.* (2013) muestran que las concentraciones pH,  $\text{NH}_4\text{N}^+$ , P disponible y K disminuyen con el tiempo de sucesión, en tanto que la materia orgánica y los micronutrientes (Zn, Fe, Cu, y B) tienden a aumentar (Li *et al.*, 2013). Controversialmente, esto muestra una posible relación directamente proporcional entre el P y N del suelo semejante a lo encontrado en recientes estudios sucesionales (Ahirwal *et al.*, 2021; Sansupa *et al.*, 2021; Semy & Singh, 2021). Por consiguiente, es necesario evaluar no solo las concentraciones de nutrientes, sino también los cambios en sus relaciones estequiométricas como factores determinantes de la fertilidad del suelo, especialmente en áreas degradadas por la minería que requieren elementos técnicos para su restauración.

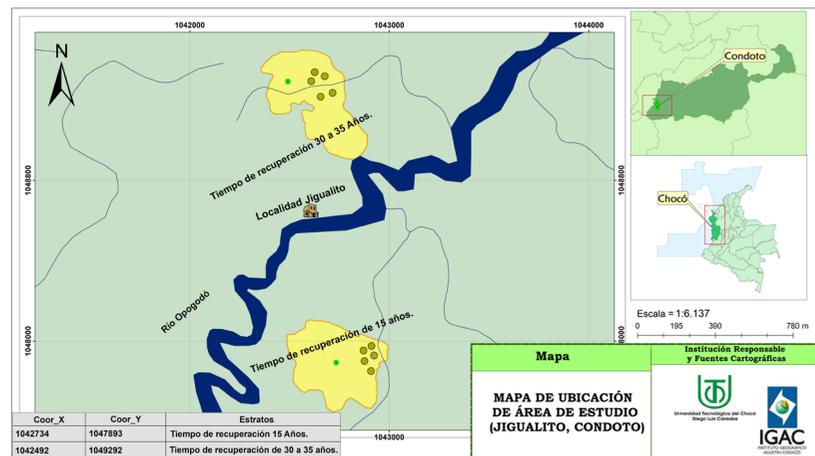
En regiones de tropicales, como el Chocó biogeográfico, la minería a cielo abierto de oro y platino tiene particular relevancia, pues se destruyen cerca de 360 hectáreas de bosque cada año en la región (IIAP, 2001; Ramírez & Ledezma, 2007; Leal, 2009). Por ello, es necesario evaluar las condiciones edáficas de las áreas degradadas por la minería, más aun si se tiene en cuenta que esta región es una de las más lluviosas del mundo (10.000 mm anuales) (Poveda *et al.*, 2004), y que las altas tasas de pluviosidad tienden a disminuir los contenidos de nutrientes por la lixiviación (Austin & Vitousek, 1998). Esto es particularmente relevante en áreas degradadas por la minería en las que los suelos han sufrido cambios considerables. Por todo ello, en la presente estudio se evaluaron los cambios en el contenido de nutrientes, las relaciones estequiométricas, la acidez y la textura en áreas degradadas por la minería con diferente edad sucesional en la región. Además, se evaluó qué tanto determinan las coberturas vegetales dichos cambios en el suelo para contar con elementos científicos que contribuyan en la restauración de dichas áreas.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se desarrolló en áreas previamente degradadas por la minería aurífera en la región del Chocó biogeográfico, Colombia, específicamente en bosques pluviales tropicales secundarios de diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito (5° 06' 01" N - 76° 32' 44" O), municipio de Condoto, subregión del San Juan (Figura 1). En esa localidad la precipitación promedio es de 8.000 mm anuales y tiene una altitud de 70 m y topografía plana. Hace parte de la subregión Central Norte del Chocó biogeográfico, que comprende las cuencas altas de los ríos Atrato y San Juan, en unidades de paisaje de piedemonte y colinas bajas con suelos húmedos de terrazas y un tipo de roca sedimentaria transicional (Poveda *et al.*, 2004). Los bosques de esta localidad son, en su mayoría, secundarios y están en diversas edades de recuperación debido a que en el área ha habido actividades de minería a cielo abierto de oro y platino en distintas décadas, lo que ha generado bosques de diferentes edades sucesionales (Tabla 1).

Los suelos de estos bosques secundarios son ultisoles, pero al ser una zona en la que previamente se desarrollaron actividades mineras, sus suelos se caracterizan por presentar mucho material rocoso y arena (Figura 2). La composición florística arbórea está dominada por especies típicas del bosque pluvial tropical de la región, como *Anthurium formosum*, *Anthurium alatum*, *Philodendron acutatum*, *Cespedesia spathulata*, *Croton chocoanus*, *Glossoloma*, *Tonina fluviatilis*, y familias botánicas como Annonaceae, Areaceae, Asteraceae, Buseraceae, Chrysobalanaceae, Clusiaceae, Cyatheaceae y Melastomataceae.



**Figura 1.** Área de estudio en la localidad de Jigualito, Municipio de Condoto, departamento del Chocó, Colombia

**Tabla 1.** Características estructurales, ecológicas y edáficas de las áreas degradadas por minería en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

Localidades	Jigualito	
Tiempo de sucesión (años)	15	30
Biomasa aérea (toneladas/hectárea)	35,17	56,3
Incremento en biomasa aérea (t/ha/año)	2,34	1,87
Promedio DAP (cm)	5,57	13,89
Altura promedio (m)	7,46	13,44
Riqueza promedio ( <i>sp</i> /cuadrante)	5,56	8,68
Abundancia promedio (individuos/cuadrante)	11,12	17,36



**Figura 2.** Condiciones del suelo en áreas degradadas por minería con diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

### ***Diseño experimental***

Para evaluar los cambios en las condiciones edáficas en las áreas degradadas con diferentes edades sucesionales, se empleó un diseño estratificado por la edad de sucesión del ecosistema con dos estratos para los muestreos. El estrato 1, edad inicial (EI), incluyó las zonas recientemente degradadas por la minería, con un tiempo de sucesión de 15,5 años expresado como >15 años. Además, este estrato se caracterizó por tener una vegetación arbustiva y leñosa pequeña, con menor biomasa aérea, diámetro promedio y riqueza de especies arbóreas (**Tabla 1**). El estrato 2, edad de recuperación (ER), correspondió a zonas que presentaban un tiempo de recuperación de entre 30 y 35 años, el cual se etiquetó como >30 años. Este estrato se caracterizó por tener una vegetación arbórea con mayor biomasa aérea, diámetro promedio y riqueza de especies (**Tabla 1**). Es importante mencionar que al tener dos variables que cambian (tiempo después del impacto y vegetación), este diseño metodológico tiene la dificultad de que estas se correlacionan entre sí. Puesto que con el paso del tiempo también cambia la vegetación, es difícil diferenciar si los cambios en los parámetros edáficos de los suelos se deben al paso del tiempo o al cambio en el tipo de la vegetación. Por lo tanto, se tomó el tiempo (años) como una variable que integra también los cambios en variables ambientales no evaluadas, como la vegetación.

### ***Establecimiento de parcelas***

En el estrato 1 (EI), dado que la vegetación predominante es arbustiva y leñosa pequeña, se establecieron cinco parcelas de 25 x 25 m (625 m<sup>2</sup>), las cuales se subdividieron en 25 cuadrantes de 5 x 5 m (25 m<sup>2</sup>) en áreas con antecedentes de actividad minera de más de 15 años de abandono. En este estrato cada mina abandonada se consideró un bloque de muestreo; en total se incluyeron cinco minas en este estrato y en cada bloque se establecieron cinco unidades experimentales permanentes de muestreo. De forma similar, en el estrato 2 (ER), correspondiente a otra área boscosa previamente degradada por la minería, pero con más de 30 años de regeneración, se instalaron cinco parcelas permanentes de 50 x 50 m (2.500 m<sup>2</sup>) dado que la vegetación es arbórea y arbustiva. Después se establecieron al interior de cada unidad de muestreo 25 cuadrantes de 10 x 10 m (100 m<sup>2</sup>) que se emplearon como unidades de muestreo, por lo que en ellos se hicieron las mediciones de suelos.

### ***Medición de las características edáficas***

En cada una de las unidades se tomaron cinco muestras compuestas de suelo a 20 cm de profundidad en las esquinas y el centro de los cuadrantes de 5 x 5 m y de 10 x 10 m. En total se tomaron 250 muestras compuestas de suelos, 125 en cada estrato sucesional. Las muestras recolectadas se enviaron al laboratorio de biogeoquímica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín en donde se analizó su textura (arena, limo y arcilla), pH, contenido de materia orgánica, Al, CICE y contenido de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) mediante las técnicas las siguientes técnicas: la textura con la técnica de Bouyoucos; el pH en potenciómetro de suelos con agua 1:2; la materia orgánica con la técnica de Walkley y Black y volumetría; el P disponible con ácido L ascórbico en espectrofotómetro UV – VIS; el N total con la técnica analítica micro-Kjeldahl; el Al con KCl 1M/volumetría NTC 5263; los nutrientes (Ca, Mg, K) con el método de acetato de amonio 1N neutro y absorción atómica (**Osorio, 2014**), en tanto que el porcentaje de carbono (C) del suelo se determinó con la ecuación: % C = MO/1.724 (**Vela et al., 2012**).

### ***Análisis estadístico***

Para evaluar la variación de las características fisicoquímicas del suelo en función del tiempo de sucesión (>15 años y >30 años), se utilizaron pruebas paramétricas (T-student, TS) y no paramétricas (de Mann-Whitney, MW) según si cumplían los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas de datos y sus residuales evaluados con los estadísticos de Bartlett, Hartley y Kurtosis (entre +2,0 y -2,0). Para determinar las correlaciones lineales y asociaciones entre variables edáficas (pH, materia orgánica, Al, N total, P, K, Ca, Mg, CICE, arena, limo y arcilla) de cada estadio sucesional se emplearon

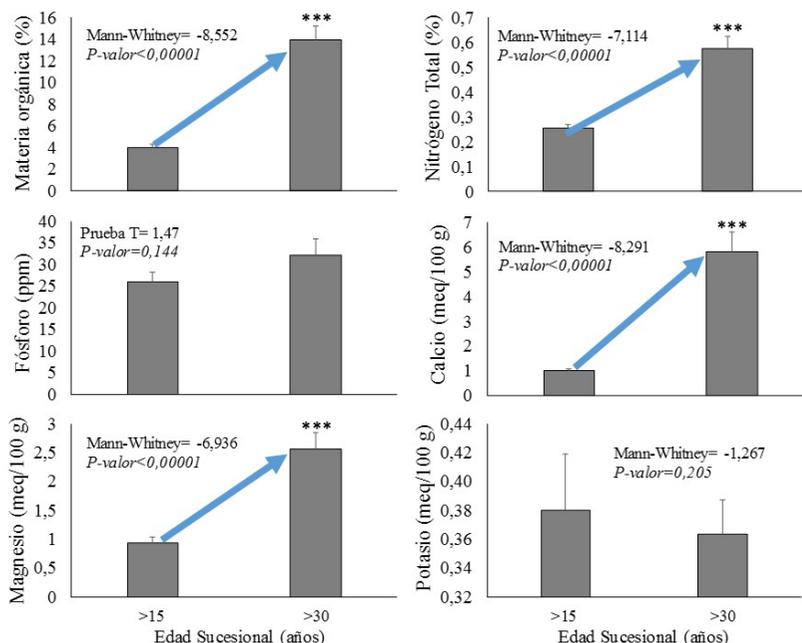
análisis de componentes principales (ACP) y correlaciones por rangos de Spearman para determinar parches edáficos de mayor o menor fertilidad en cada estrato evaluado. Los análisis se hicieron en el entorno de programación R (**R Core Team**, 2012).

## Resultados

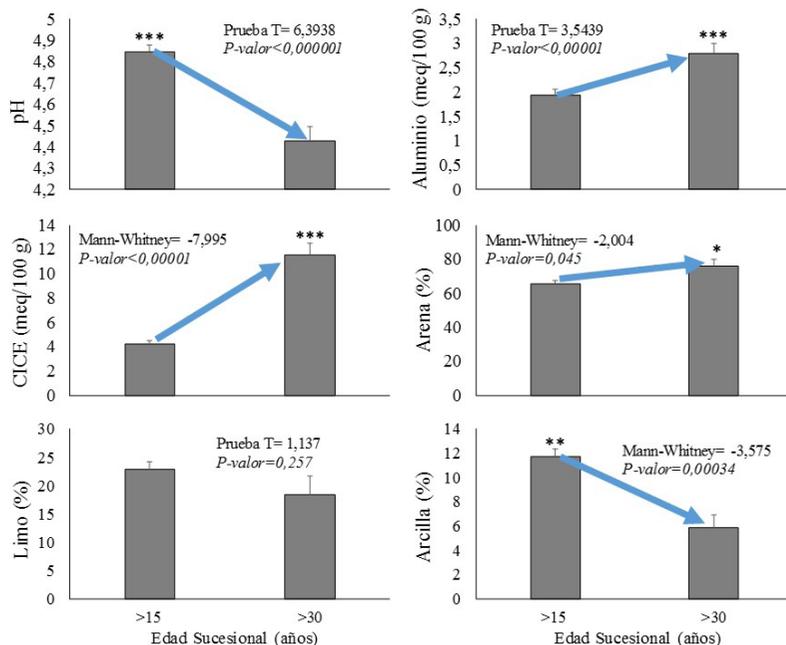
En las áreas degradadas por minería a cielo abierto los suelos presentaron altos porcentajes de arena (66,7 %), acidez (pH=4,73), materia orgánica (6,62 %), P disponible (28,21 ppm), N total (0,34 %), K (0,38 meq/100 g) y Al (2,15 meq/100 g), pero bajas cantidades de Ca (2,28 meq/100 g) y Mg (1,37 meq/100 g) (**Tabla 2**). Al comparar los parámetros fisicoquímicos de ambas áreas (>15 y >30 años), se evidenció que los suelos de >15 años presentaron menos materia orgánica (MW=-8,85 p<0,001), N total (MW=-7,11; p<0,001), Mg (MW=-6,93; p<0,001), Ca (MW=-8,29; p<0,001), Al (prueba T= 3,54; p<0,001), CICE (MW=-7,99; p<0,001) y arena (MW=-2,0; p = 0,045) (**Tabla 2, Figuras 3 y 4**). Además, tuvieron un mayor pH (prueba T= 6,39; p<0,001) y arcilla (MW=-3,57; p<0,001), pero similar concentración de P disponible (prueba T= 1,47; p=0,14), K (MW=-1,26; p=0,2) y limo (prueba T= 1,13; p=0,25) (**Tabla 2, Figuras 3 y 4**). En síntesis, al evaluar los cambios en los suelos con el paso tiempo se observó que el P disponible, el K y el limo fueron similares en ambas edades sucesionales, en tanto que las cantidades de materia orgánica, N total, Ca, Mg, CICE, Al y arena aumentaron con la edad (**Figuras 3 y 4**). Por el contrario, el pH y la arcilla disminuyeron (**Figura 4**). En concreto, se encontró un aumento de nutrientes, acidez y disponibilidad de Al con el paso del tiempo de sucesión.

**Tabla 2.** Parámetros fisicoquímicos del suelo en áreas degradadas por minería en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

Parámetros fisicoquímicos	Áreas degradadas por minería (promedio de >15 y >30 años)	>15 años de sucesión	>30 años de sucesión
pH	4,73	4,84	4,43
Materia orgánica (%)	6,62	4	13,9
Carbono (%)	3,84	2,32	8,06
Fósforo (ppm)	28,21	26,02	32,09
Nitrógeno total (%)	0,34	0,25	0,58
Aluminio (meq/100 g)	2,15	1,93	2,78
Calcio (meq/100 g)	2,28	1,01	5,8
Magnesio (meq/100 g)	1,37	0,94	2,56
Potasio (meq/100 g)	0,38	0,38	0,36
CICE (meq/100 g)	6,17	4,25	11,51
Saturación de Al (%)	34,85	45,41	24,15
Arena (%)	66,73	65,54	75,85
Limo (%)	22,25	22,76	18,31
Arcilla (%)	11,03	11,7	5,85
Clase textural	Franco arenoso	Franco arenoso	Arenoso franco
Relación C/N	11,29	9,28	13,90
Relación P/N	82,97	104,08	55,33
Relación C/P	0,14	0,09	0,25
Relación Ca/Mg	1,66	1,07	2,27
Relación K/Mg	0,28	0,40	0,14



**Figura 3.** Cambios en los nutrientes del suelo en áreas degradadas por minería con diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico



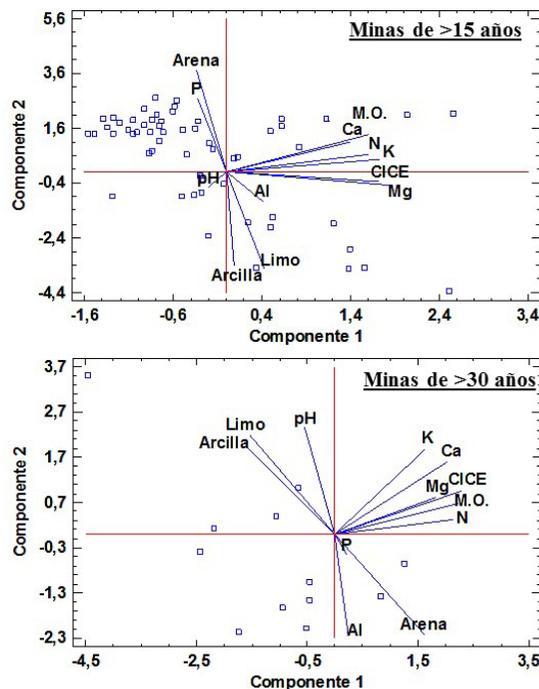
**Figura 4.** Cambios en los parámetros fisicoquímicos del suelo en áreas degradadas por minería con diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

En términos de las relaciones estequiométricas de nutrientes se observó que la saturación de Al disminuyó de 45,41 % en áreas con >15 años de abandono a 24,15 % en zonas mineras de >30 años de recuperación (Tabla 2). Por otra parte, la relación C/N incrementó de 9,28 en áreas con >15 años a 13,9 en zonas con > 30 años de sucesión. Asimismo, las relaciones C/P y Ca/Mg incrementaron con el tiempo, en tanto que las

relaciones de P/N y K/Mg disminuyeron con la edad de sucesión (**Tabla 2**). Mediante el ACP se evidenció que en las áreas degradadas con > 15 años de sucesión hubo asociaciones lineales positivas de variables como la materia orgánica, el Ca, el N total, el K, el Mg y la CICE, formando un primer componente ( $C1=38,6\%$ ;  $Eigenvalue=4,64$ ), mientras que el P y la arena se asociaron de forma inversamente proporcional con la arcilla y limo en un segundo componente ( $C2=27,9\%$ ;  $Eigenvalue=3,35$ ). En las áreas de >30 años las variables de materia orgánica, Ca, N total, K, Mg y CICE se asociaron positivamente formando un componente ( $C1=45,1\%$ ;  $Eigenvalue=5,4$ ), pero el Al y la arena se asociaron de forma inversamente proporcional con el pH, la arcilla y el limo en un segundo componente ( $C2=25,7\%$ ;  $Eigenvalue=3,08$ ) (**Figura 5**).

## Discusión

En el presente estudio se evidenciaron cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo de las áreas que han sido afectadas por la minería a cielo abierto; particularmente, se evidenció la pérdida de horizontes orgánicos y superficiales del suelo y, además, un mayor porcentaje de arena (entre 66,7 y 75,8 %), piedras y rocas, lo que coincide con lo reportado en diversos estudios en áreas previamente degradadas por la minería, donde los porcentajes de arena en el suelo aumentaron debido a dicha actividad (**Oktavia et al., 2015; David-Jiraldo, 2017; Wongprom et al., 2020**), lo cual es un retroceso en términos pedogenéticos, pues los suelos de esta región se caracterizan por ser de texturas predominantemente finas (franco arcilloso), ácidos y de baja fertilidad (**Rodríguez, 1989; IGAC, 2006; Quinto & Moreno, 2016**), y con la actividad minera adquieren texturas franco arenosas y arenosas franco, principalmente, con lo que se reduce su capacidad de retener nutrientes debido a los poros de mayor tamaño que facilitan la lixiviación generada por las lluvias (**FAO, 2019**). Esta situación es uno de los factores que posiblemente explica la lenta recuperación de las áreas previamente degradadas por la minería en el Chocó, dado que la precipitación y la consecuente lixiviación son muy altas (**Quinto & Moreno, 2016**) y, por ende, la retención de nutrientes se reduce considerablemente.



**Figura 5.** Análisis de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos del suelo en áreas degradadas por minería con diferente edad sucesional en la localidad de Jigualito, Chocó biogeográfico

En estudios previos se evidenció que con la minería a cielo abierto el suelo residual tiende a presentar muy baja fertilidad y texturas gruesas, con muy poco contenido de humedad y bajas proporciones de limo, arcillas y materia orgánica, a causa del proceso de arrastre y deposición hídrica (Chacón, 1992; Oktavia *et al.*, 2015; Wongprom *et al.*, 2020). Asimismo, dado que el suelo queda totalmente expuesto, los nutrientes se pierden fácilmente por lixiviación (ELAW, 2010; Wongpro *et al.*, 2020). Esta situación es patente en las minas abandonadas del Chocó, donde los suelos quedaron totalmente expuestos, con texturas gruesas, con muy poco contenido de humedad y bajas proporciones de limo y arcillas, lo cual ha afectado la recuperación del ecosistema en general.

Los suelos del departamento del Chocó son mayoritariamente minerales, poco evolucionados, ácidos y con un lavado intenso de nutrientes por la acción de la precipitación, que supera los 5.000 mm anuales (IGAC, 2006; Quinto & Moreno, 2016). Específicamente, el área en la que se evaluaron los suelos degradados por la minería corresponde a suelos de lomerío infértiles y muy ácidos, que se caracterizan porque se han originado sobre arcillolitas y limolitas (IGAC, 2006). La acidez edáfica de las minas abandonadas es similar a lo registrado previamente en áreas degradadas por la minería en bosques de Indonesia (Oktavia *et al.*, 2015), y en bosques del Chocó biogeográfico. Por ejemplo, Faber-Langendoen & Gentry (1991) registraron un pH de entre 4,0 y 4,6 en los bosques tropicales del Bajo Calima. Asimismo, Quinto & Moreno (2016) evaluaron suelos ácidos en bosques de Pacurita (pH=4,0), Salero (pH=4,8) y Opogodó (pH=5,0), en la misma región geográfica. Por su parte, Copete *et al.* (2019) observaron suelos ácidos en Capurganá (pH=4,97) y Santo Domingo (pH=5,23), así como Ramírez *et al.* (2019), quienes encontraron que tanto los suelos afectados por la minería como los bosques aledaños presentaban acidez, como también quedó registrado en nuestro estudio. Probablemente la acidez registrada en los suelos degradados se debe a factores como la alta precipitación, que promueve la meteorización de rocas ígneas y la liberación de cationes (Ca, Mg, K y Na) (Austin & Vitousek 1998) y su posterior lixiviación, lo que incrementa la acumulación edáfica de iones ácidos (H y Al). Asimismo, el alto contenido de materia orgánica favorece la liberación de ácido carbónico y la fijación biológica del N que libera iones de H, lo que en conjunto produce mayor acidez edáfica (Jenny, 1941; Sadzawka & Campillo, 1993).

El contenido de Al registrado en áreas degradadas por minería fue muy alto, lo que se asemeja a lo reportado en estudios previos en las minas de la región (Ramírez *et al.*, 2019), aunque menor al registrado en suelos del Bajo Calima (Al=4,6-5,7 meq/100 g) (Faber-Langendoen & Gentry, 1991), y mayor a lo registrado en suelos de Salero (0,48 meq/100 g), Opogodó (0,12 meq/100 g), y Pacurita (0,94 meq/100 g) (Quinto & Moreno, 2016) y en ecosistemas boscosos de la región. Estos resultados muestran que la disponibilidad de Al no está directamente determinada por el uso de suelo, en términos de la minería, ni por la presencia de cobertura boscosa y que, al parecer, factores edáficos como la meteorización de rocas tienen un efecto más preponderante (Austin & Vitousek, 1998).

Sin embargo, lo interesante no es solo el contenido de Al, sino su porcentaje de saturación, que en las minas recientemente abandonadas (<15 años) presentó valores muy altos (45,41 %). Esto es preocupante, pues una alta saturación de Al genera toxicidad. En tal sentido, se ha evidenciado que los altos contenidos de Al disminuyen la elongación de las raíces, reducen el crecimiento del tallo, restringen la producción de biomasa, generan desequilibrio de nutrientes, alteran procesos metabólicos y fisiológicos y reducen la productividad del ecosistema (Shetty *et al.*, 2021). Además, la toxicidad por Al genera reducción de la absorción de nutrientes del suelo, clorosis, necrosis, disminución del tamaño de las hojas, estrés nutricional, y reducción de la tasa fotosintética de las plantas (Chandra & Keshavkant, 2021). Esta toxicidad sería la responsable del limitado desarrollo de los ecosistemas en áreas previamente degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico. Los datos muestran que esta se reduce con el paso del tiempo, pues en minas con > 30 años, la saturación de Al fue menor, probablemente por la incorporación de materiales orgánicos al suelo que tienen la capacidad de retener estos cationes, por lo que allí la vegetación muestra mayor biomasa, diversidad, estructura y desarrollo ecológico.

El porcentaje de materia orgánica registrado en áreas degradadas por la minería en el Chocó fue alto (6,62 %) y se incrementó con el paso del tiempo. Sin embargo, en estudios previos en áreas degradadas por la minería se ha evidenciado que el contenido de materia orgánica del suelo disminuye drásticamente (**Oktavia et al., 2015; Wongprom et al., 2020**). El hecho de que en áreas degradadas por la minería en el Chocó la materia orgánica sea alta ratifica lo observado en distintos bosques de la región chocoana, en los que también se han encontrado porcentajes altos de esta en el suelo (**Quinto & Moreno, 2016**). Por ejemplo, en los suelos de las localidades de Bajo Calima (13,7 %), Salero (6,7 %), Opogodó (11,9 %), Pacurita (4,1 %) y Jigualito (12,8 %), los valores de materia orgánica evaluados en bosques fueron altos (**Faber-Langendoen & Gentry, 1991; Quinto & Moreno, 2016; Ramírez et al., 2019**). Asimismo, en las minas de Jigualito se evidenció un aumento de materia orgánica con el paso del tiempo (**Ramírez et al., 2019**), similar a lo observado en este estudio. En los estudios de **Wongprom et al. (2020)**, **Ahirwal et al. (2021)**, **Sansupa et al. (2021)** y **Semy & Singh (2021)** también se han reportado incrementos en los contenidos de materia orgánica con el tiempo de sucesión en áreas degradadas por la minería, de forma análoga a lo encontrado en nuestro estudio. Una de las posibles razones de este incremento con la sucesión está relacionada con el aumento en la producción de hojarasca, la productividad primaria neta, el reciclaje de nutrientes, la biomasa aérea de árboles, y la estructura del bosque en cuanto a la sucesión vegetal (**Guariguata & Ostertag, 2001**). Otra razón es que las tasas de descomposición de hojarasca posiblemente son menores que las de producción, que en estos bosques pueden oscilar entre 7,0 y 8,0 t ha año<sup>-1</sup> (**Quinto et al., 2007; Quinto et al., 2017**), es decir, que la tasa de adición (producción) es mayor que la de descomposición, lo que genera acumulación de materia orgánica en el suelo (**Bot & Benites – FAO, 2005**). Posiblemente, la alta precipitación afecta la calidad de la hojarasca, reduciendo su contenido de nutrientes (**Santiago et al., 2005**), lo que genera una reducción de la descomposición y explicaría la acumulación de materia orgánica en el suelo. En concreto, se observó que las áreas degradadas recién afectadas (< 15 años) y con menor biomasa aérea arbórea presentaban una adición de materia orgánica mucho menor y menor acumulación en el suelo, en comparación con las áreas degradadas de mayor edad y biomasa aérea.

Es importante mencionar que la acumulación de materia orgánica es fundamental para la fertilidad y la salud del suelo (**David-Jiraldó, 2017**), puesto que esta provee una buena estructura edáfica, representa un suministro continuo de nutrientes, contribuye con el intercambio iónico, es un reservorio de N y otros minerales necesarios para las plantas, ayuda en la formación de agregados estables en el suelo, protege la superficie edáfica, retiene humedad, controla la inmovilización y liberación de nutrientes, y favorece el almacenamiento de carbono del ecosistema (**Ross, 1993; Craswell & Lefroy, 2001**). Además, la materia orgánica es conductora de la actividad biológica del suelo, permite la aireación edáfica, controla el reciclaje de nutrientes, y reduce las pérdidas de minerales por lixiviación (**Bot & Benites – FAO, 2005; Adiaha, 2017**). Por tal razón, es lógico afirmar que su acumulación estaría contribuyendo de forma significativa con la recuperación de las áreas degradadas por la minería en la región del Chocó.

Los cationes básicos (Ca y Mg) presentaron bajos contenidos en áreas degradadas recientemente por la minería a cielo abierto, pero con el paso del tiempo incrementaron su disponibilidad significativamente. Así se ha reportado en otras áreas degradadas por la minería (**Oktavia et al., 2015; Wongprom et al., 2020**). El hecho de presentar bajas concentraciones corrobora lo hallado previamente en la región en distintas investigaciones (**Quinto & Moreno, 2016; Ramírez et al., 2019**). Estas bajas concentraciones de Ca y Mg en suelos del Chocó biogeográfico posiblemente se deben a los altos niveles de precipitación (**Poveda, et al., 2004**), que generan lixiviación y arrastre de nutrientes constantemente (**IGAC, 2006; Austin & Vitousek, 1998; Quinto & Moreno, 2016**). Además, estos minerales (Ca y Mg) aumentaron con el paso del tiempo, a los pocos años (<30 años) en términos sucesionales, como también se ha registrado en minas de bosques tropicales (**Ahirwal et al., 2021; Sansupa et al., 2021; Semy & Singh, 2021**),

y en sucesiones primarias y secundarias (**Guariguata & Ostertag, 2001**). Esta mayor disponibilidad en los contenidos de estos cationes también se debe a la meteorización de las rocas que se presenta en mayor proporción debido a la acción de la minería, pues el subsuelo y las rocas ígneas quedan expuestos, lo que facilita la liberación mineral de nutrientes. Además, otra causa que explica el aumento edáfico de estos minerales está relacionado con la mayor disponibilidad de materia orgánica al transcurrir el tiempo de sucesión (**Guariguata & Ostertag, 2001; Bot & Benites – FAO, 2005**), lo que incrementa el suministro de nutrientes al suelo, incluidos el Ca y Mg. En síntesis, la acción conjunta de la meteorización de rocas, la acumulación de materia orgánica y la minería a cielo abierto explican la mayor parte del aumento de estos nutrientes con el tiempo, en escalas sucesionales breves, en el Chocó.

El contenido edáfico de K fue alto en las áreas degradadas por la minería, lo que posiblemente se debe al hecho de que es un ion mineral muy móvil en los ecosistemas terrestres (**Osorio, 2014**), y las deposiciones provenientes del dosel del bosque por la acción de las lluvias incrementan su disponibilidad (**Quinto & Moreno, 2016**). Asimismo, su disponibilidad edáfica tiende a ser alta en estos ecosistemas probablemente por los suministros constantes provenientes de la meteorización de rocas (**Austin & Vitousek, 1998**) causada, principalmente, por la minería a cielo abierto recientemente realizada en la localidad.

Los contenidos de P disponible y N total en las áreas degradadas por minería fueron altos. La razón de lo primero se relaciona con la acción de la minería sobre el suelo, pues se remueven las rocas, principalmente del tipo apatita, que contienen el P del suelo en sus distintas formas (**Reed et al., 2011**), y por esta acción mecánica y la consecuente meteorización, se incrementa su disponibilidad edáfica. El incremento del N total, por su parte, está relacionado con distintos factores como el aumento en el contenido de materia orgánica del suelo (**Bot & Benites – FAO, 2005**), la colonización de plantas leguminosas que fijan el N (**Cleveland et al., 1999**), y la mayor disponibilidad de P edáfico (**Reed et al., 2011**), que ayudan a incrementar su disponibilidad (**Hedin et al., 2009**).

A pesar de su alto contenido, el P disponible no incrementó su disponibilidad edáfica en la escala relativamente pequeña de tiempo (< 30 años), contrario al comportamiento del N total; en consecuencia, se evidenció que las tendencias del P y el N con la sucesión fueron parcialmente contrarias a lo reportado en otros estudios realizados en minas, en los que estos minerales aumentaron con el tiempo de la sucesión o disminuyeron su contenido en las minas comparadas con los bosques adyacentes, lo que semeja un gradiente sucesional (**Wongprom et al., 2020; Ahirwal et al., 2021; Sansupa et al., 2021; Semy & Singh, 2021**).

Probablemente, el hecho de que el P disponible no mostrara un incremento significativo en sus contenidos edáficos en minas de entre 15 y 30 años, puede estar relacionado con la escala de tiempo evaluada, porque seguramente 30 años no es un tiempo significativo para evidenciar un desarrollo del suelo (**Jenny, 1941**); en efecto, las transformaciones de formas disponibles (biodisponibles) del P a formas no disponibles o inmóviles (ocuidas) requieren escalas temporales mucho mayores, como se ha evidenciado en estudios previos que muestran cómo dichos cambios pueden tener rangos entre los 300 y los 20.000 años de pedogénesis (**Crews et al., 1995**). Asimismo, la poca variación temporal del P disponible indica que, en términos de procesos de pedogénesis, no hubo cambios significativos a nivel edáfico, y ni siquiera se ha formado la cantidad suficiente de arcilla (tipo caolinita) necesaria para la fijación del P en óxidos de Al ( $\text{AlPO}_4$ ) y Fe ( $\text{FePO}_4$ ) (**Reed et al., 2011**). Esta sería, entonces, una de las razones que explicaría por qué el P no cambió sus concentraciones en la escala de tiempo evaluada.

En este sentido, **Walker & Syers (1976)** presentaron un modelo que describe el desarrollo del P en distintas formas (inmovilizado, ocluido, biodisponible, orgánico y total) a través de procesos de formación del suelo (pedogénesis). En dicho modelo se describe que en suelos tropicales como los ultisoles y oxisoles, en las edades tempranas el P se encuentra en mayor proporción en formas biodisponibles ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) para las plantas y microorganismos debido a la meteorización de rocas o minerales primarios; posteriormente, en edades intermedias de pedogénesis, el P se encuentra más equitativamente distribuido

entre sus distintas formas, y, finalmente, en edades de mayor desarrollo, se encuentra en su menor concentración (**Walker & Syers, 1976**). Posiblemente en áreas degradadas por la minería la acción mecánica de las retroexcavadoras genera liberación del P en formas biológicamente disponibles como en las edades iniciales de la pedogénesis, lo que también explicaría su alto contenido edáfico en áreas previamente intervenidas por la acción minera en el Chocó biogeográfico. Asimismo, la posterior meteorización de rocas y material parental (**Jenny, 1941**), que tiende a ser mayor debido a la influencia de las altas temperaturas y el clima lluvioso de la región, contribuye a una mayor disponibilidad del P en el suelo.

Al igual que el P disponible, el contenido de N total del suelo fue alto en las áreas degradadas. Entre las posibles razones para ello se pueden mencionar las siguientes: las altas tasas de fijación de N por árboles y arbustos del grupo de las leguminosas (**Cleveland *et al.*, 1999**), en especial de la familia Fabaceae, que están entre las más abundantes, diversas y ampliamente distribuidas en la región chocona (**Rangel & Rivera-Díaz, 2004**); las altas tasas de fijación de N<sub>2</sub> por acción de las bacterias libres en los suelos de la región (**Cleveland *et al.*, 1999**; **Reed *et al.*, 2008**); las tasas de reciclaje de N del ecosistema (**Vitousek, 1984**; **Matson & Vitousek, 1990**); los considerables aportes generados por los porcentajes de materia orgánica de la zona (**Bot & Benites – FAO, 2005**), y la interacción con el P edáfico, que en altas cantidades, regula la fijación de N<sub>2</sub> por parte de las bacterias y leguminosas en el ecosistema (**Reed *et al.*, 2011**), así como la disponibilidad de N total influye en la producción y actividad de la enzima fosfatasa en el suelo (**Treseder & Vitousek, 2001**), enzima que contribuye con la mineralización del P fijado en compuestos edáficos (**Reed *et al.*, 2011**), por lo que se facilita su biodisponibilidad.

El incremento significativo del N total a lo largo del tiempo de recuperación del suelo en áreas degradadas por la minería en la localidad estudiada sigue un patrón similar al descrito en las hipótesis sucesionales, las cuales plantean que en las edades sucesionales iniciales, en los suelos tropicales hay una limitación del N debido a su poca fijación biológica y la escasez de plantas leguminosas (**Walker, 1993**), semejante a lo que ocurre con la actividad minera en la región, pues no quedan árboles que fijen el N<sub>2</sub> atmosférico en el suelo. Según las hipótesis mencionadas, en la medida en que se presenta una mayor colonización de plantas fijadoras de N<sub>2</sub> y avanza la sucesión, se reduce tal limitación (**Cleveland *et al.*, 1999**; **Walker & del Moral, 2008**), como se ha corroborado en las áreas degradadas por minería con 15 y 30 años de recuperación.

Los altos contenidos edáficos de P biodisponible y N total en edades tempranas de la pedogénesis y de la sucesión, muestran que posiblemente estos nutrientes no están limitando aún la productividad primaria neta (PPN) y el funcionamiento del ecosistema. Por el contrario, en estudios realizados en cronosecuencias mediante ensayos de fertilización en bosques lluviosos de Hawái, se evidenció que en suelos de pedogénesis reciente ( $\approx 300$  años) la PPN aérea se vio limitada por el N, en tanto que en suelos de desarrollo intermedio (20,000 años) esta se vio limitada tanto por el N como por el P, y en suelos de mayor desarrollo ( $4,1 \times 10^6$  años) por el P disponible (**Vitousek & Farrington, 1997**; **Harrington *et al.*, 2001**). En consecuencia, para poder corroborar la limitación de la PPN y del funcionamiento de los ecosistemas boscosos por el P disponible y el N total en áreas degradadas por la minería, se requiere determinarla mediante mediciones de la PPN, la descomposición y el crecimiento, entre otros, y con ensayos de fertilización en el ecosistema, pues los contenidos de nutrientes del suelo, por sí solos, no permiten evidenciar dicha limitación.

En síntesis, las condiciones edáficas de las áreas degradadas por la minería estudiadas muestran que, según las cantidades de materia orgánica, N total, P disponible, K, Ca, y Mg, los suelos pueden ser fértiles para el desarrollo de la vegetación; sin embargo, las altas concentraciones de Al y la poca concentración de arcilla evidencia que este ecosistema no es favorable para el desarrollo de la vegetación ni para su adecuado funcionamiento. En conclusión, es necesario favorecer el reciclaje de nutrientes y de materia orgánica

que favorece las funciones del suelo, además de corregir la toxicidad debida al Al y, en lo posible, mejorar las condiciones texturales, las cuales requieren un mayor tiempo de desarrollo edáfico.

## Agradecimientos

La presente investigación fue financiada con recursos del proyecto titulado “Evaluación del efecto de la fertilización del suelo sobre la producción neta del ecosistema en áreas degradadas por minería, como estrategia para potenciar la captura de carbono y la venta de servicios ambientales en el Chocó Biogeográfico” (Código 1128-852-72243), presentado por la Universidad Tecnológica del Chocó “D.L.C.”, la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, la Universidad de Valladolid (España), el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico “John Von Neumann” – IIAP, y el SENA Chocó, y aprobado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

## Contribución de los autores

HQM: administración del proyecto, experimentación y escritura del manuscrito; GAV: investigación, experimentación y escritura del manuscrito; HG: conceptualización, revisión y escritura del manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no existe conflicto de intereses que pueda afectar la publicación de este estudio.

## Referencias

- Adiaha, M. S.** (2017). The role of organic matter in tropical soil productivity. *World Scientific News*, 86(1), 1-58.
- Ahirwal, J., Kumari, S., Singh, A. K., Kumar, A., Maiti, S. K.** (2021). Changes in soil properties and carbon fluxes following afforestation and agriculture in tropical forest. *Ecological Indicators* 123, 107354.
- Austin, A. T. & Vitousek P.M.** (1998). Nutrient dynamics on a precipitation gradient in Hawaii. *Oecologia* 113, 519-529.
- Bot, A. & Benites J. – FAO.** (2005). The importance of soil organic matter Key to drought-resistant soil and sustained food production. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fao Soils Bulletin 80.
- Chacón, I. E.** (1992). Pequeña y mediana minería aluvional. Oro y diamante. Tomo II. Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar. Fundaudo, Ciudad Bolívar. p. 160.
- Chandra, J. & Keshavkant, S.** (2021). Mechanisms underlying the phytotoxicity and genotoxicity of aluminum and their alleviation strategies: A review. *Chemosphere*, 278, 130384.
- Chazdon, R. L.** (2003). Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6(1), 51-71.
- Cleveland, C. C., Townsend, A. R., Schimel, D. S., Fisher, H., Howarth, R. W., Hedin, L. O., Perakis, S. S., Latty, E. F., Von Fischer, J. C., Elseroad, A., Wasson, M. F.** (1999). Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N<sub>2</sub>) fixation in natural ecosystems. *Global Biogeochem. Cycles*, 13(2), 623- 645.
- Copete, J. C., Cámara-Leret, R., Sánchez, M., Balslev, H.** (2019). Relación entre la composición florística y los nutrientes del suelo en comunidades de palmas del Chocó biogeográfico en Colombia y Ecuador. *Revista de Biología Tropical*, 67(4), 716-732.
- Craswell, E.T. & Lefroy, R.B.D.** (2001). The role and function of organic matter in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 7-18.
- Crews, T.E., Kitayama, K., Fownes, J.H., Riley, R.H., Herbert, D.A., Mueller-Dombois, D., Vitousek, P.M.** (1995). Changes in soil phosphorus fractions an ecosystem dynamic across a long chronosequence in Hawaii. *Ecology*, 76, 1407-1424.
- Davidson, E.A., de Carvalho, C.J.R. Vieira, I.C.G., Figueiredo, R.D., Moutinho, P., Ishida, F.Y., dos Santos, M.T.P., Guerrero, J.B., Kalif, K., Saba, R. T.** (2004). Nitrogen and phosphorus limitation of biomass growth in a tropical secondary forest. *Ecological Applications*, 14, 150-163.

- David-Jirald, R.D.** (2017). Procesos de degradación de suelos asociados a minería aurífera a cielo abierto, caso de estudio Bajo Cauca Antioqueño. Tesis de Maestría en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Medellín, Colombia.
- Diaz, W.A. & Elcoro, S.** (2009). Plantas colonizadoras en áreas perturbadas por la minería en el Estado Bolívar, Venezuela. *Acta Botánica Venezuela*, 32(2), 453-466.
- Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW).** (2010). Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs. 1st Edition. Eugene, OR 97403. U.S.A. p. 122.
- Faber-Langendoen, D. & Gentry, A. H.** (1991). The structure and diversity of rain forests at Bajo Calima, Chocó Region, Western Colombia. *Biotropica*, 23, 2-11.
- FAO & PNUMA.** (2020). El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma. Italia. FAO. p. 224.
- FAO.** (2019). Textura del suelo. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. p. 18.
- Groom, M. & Vynne, C. H.** (2006). Habitat Degradation and Loss. In Groom, M., G. Meffe, and C. Carroll (Eds). *Principles of Conservation Biology*. Third Edition. Sunderland, Massachusetts. USA. 793 pg.
- Guariguata, M. & R. Ostertag.** (2001). Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics. *Forest Ecology and Management*, 148, 185-206.
- Harrington, R.A., Fownes, J.H., Vitousek, P. M.** (2001). Production and resource use efficiencies in N and P-limited tropical forests: a comparison of responses to long-term fertilization. *Ecosystems*, 4, 646-657.
- Hedin, L.O., Brookshire, J., D. Menge, Barron. A.R.** (2009). The Nitrogen Paradox in Tropical Forest Ecosystems. *The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 613-635.
- Holl, K.D.** (1999). Factors limiting tropical rain forest regeneration in abandoned pasture: seed rain, seed germination, microclimate, and soil. *Biotropica*, 31(2), 229-242.
- Holl, K.D.** (2002). Tropical moist forest. In Perrow M.R. & A.J. Davy (Editors). Handbook of ecological restoration. Volume 2. Restoration in Practice. Cambridge University Press. Cambridge. UK. pp. 539-558.
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP).** (2001). Informe Técnico Aspectos Mineros en el Chocó. Informe de Proyecto. Quibdó, Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.** (2006). Chocó Características geográficas. Bogotá. Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 236 p.
- Jenny H.** (1941). Factors of soil formation. McGraw-Hill, New York, NY. p. 281.
- Li, Y., Yang, F., Ou, Y., Zhang, D., Liu, J., Chu, G., Zhang, Y., Otieno, D., Zhou, G.** (2013). Changes in Forest Soil Properties in Different Successional Stages in Lower Tropical China. *PLoS ONE* 8(11), e81359.
- Matson, P. A. & Vitousek P.M.** (1990). Ecosystem approach to a global nitrous oxide budget. *Bioscience*, 40, 667-672.
- Meffe, G. K. & Carroll, C. R.** (1994). Principles of Conservation biology. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, Massachusetts. USA. p. 600.
- Osorio, N. W.** (2014). Manejo de nutrientes en suelos del Trópico. Segunda edición. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Medellín, Colombia. p. 416.
- Oktavia, D., Setiadi, Y., Hilwan, I.** (2015). The comparison of soil properties in heath forest and post-tin mined land: Basic for ecosystem restoration. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 124-131.
- Pallavicini, Y., Alday, J.G., Martínez-Ruiz, C.** (2015). Factors affecting herbaceous richness and biomass accumulation patterns of reclaimed coal mines. *Land degradation and Development*, 26, 211-217.
- Poveda, I.C., Rojas, C., Rudas, A., Rangel, O.** (2004). El Chocó biogeográfico: Ambiente Físico. En Rangel, O. (eds.). Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/Costa Pacífica. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1024 p.
- Quinto, H. & Moreno, F.H.** (2016). Precipitation effects on soil characteristics in tropical rain forests of the Chocó biogeographical region. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(1), 7813-7823.
- Quinto, H., & Moreno, F.** (2017). Net primary productivity and edaphic fertility in two pluvial tropical forests in the Chocó biogeographical region of Colombia. *PLoS ONE*, 12(1), e0168211.
- Quinto, H., Ramos, Y. A., Abadía, D.** (2007). Cuantificación de la caída de hojarasca como medida de la productividad primaria neta en un Bosque Pluvial Tropical en Salero, Unión Panamericana, Chocó – Colombia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó*, 26, 28-41.
- R Core Team.** (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

- Ramírez, G., Quinto, H., Vargas-Porras L., Rangel J. O.** (2019). Temporary Effect of Mining on Breathing and on the Physicochemical Conditions of Soil. *Modern Environmental Science and Engineering*, 5(9), 837-848.
- Rangel, J.O. & Rivera-Díaz, O.** (2004). Diversidad y riqueza de espermatófitos en el Chocó biogeográfico. En Rangel, O. (eds.). Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/ Costa Pacífica. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1024 p.
- Reed, S.C. Townsend, A.R., Taylor, P.G., Cleveland, C.C.** (2011). Phosphorus Cycling in Tropical Forests Growing on Highly Weathered Soils. En E.K. Bunemann *et al.* (eds.), Phosphorus in Action, Soil Biology 26 (p; 339- 369). Berlin, Alemania. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Reed, S.C., Cleveland, C.C., Townsend, A.R.** (2008). Tree species control rates of free-living nitrogen fixation in a tropical rain forest. *Ecology*, 89, 2924-2934.
- Rodríguez, J. C.** (1989). Consideraciones sobre la Biomasa, Composición Química y Dinámica del Bosque Pluvial Tropical de Colinas Bajas. Bajo Calima. Buenaventura, Colombia. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. CONIF. Serie Documental N° 16 Bogotá, D.E. – Colombia.
- Ross, S. M.** (1993). Organic matter in tropical soils: current conditions, concerns and prospects for conservation. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 17(3), 265-305.
- Sadzawka R. A. & Campillo, R. R.** (1993). Problemática de la acidez de los suelos de la IX Región. I. Génesis y características del proceso. *Investigación y Progreso Agropecuario Carillanca*, 12(3), 3-7.
- Sansupa, C., Purahong, W., Wubet, T., Tiansawat, P., Pathom-Aree, W., Teaumroong, N., Chantawannakul, P., Buscot, F., Elliott, S., Disayathanoowat, T.** (2021). Soil bacterial communities and their associated functions for forest restoration on a limestone mine in northern Thailand. *PLoS ONE*, 16(4), e0248806.
- Santiago, L.S., Schuur, E.A.G., Silvera, K.** (2005). Nutrient cycling and plant-soil feedbacks along a precipitation gradient in lowland Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4), 461-470.
- Semy, K. & Singh, M. R.** (2021). Comparative Assessment on the physico-chemical properties of coal mining affected and non-affected forest soil at Changki, Nagaland. *Indian Journal of Ecology*, 48(1), 36-42.
- Shetty, R., V idya, C.S.N., Prakash, N.B., Lux, A., Vaculik, M.** (2021). Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. *Science of the Total Environment*, 765(15), 142744.
- Treseder, K. & Vitousek, P.** (2001). Effects of soil nutrient availability on investment in acquisition of N and P in Hawaiian rain forests. *Ecology*, 82, 946-954.
- Vela, G., López-Blanco J., Rodríguez-Gamiño, M.** (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 77, 18-30.
- Vitousek, P. M.** (1984). Litterfall, Nutrient Cycling and Nutrient Limitation in Tropical Forests. *Ecology*, 65, 285-298.
- Vitousek, P., Porder, S., Houlton, B.Z., Chadwick, O.A.** (2010). Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen–phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20(1), 5- 15.
- Vitousek, P.M. & Farrington, H.** (1997). Nutrient limitation and soil development: Experimental test of a biogeochemical theory. *Biogeochemistry*, 37, 63-75.
- Vitousek, P.M., Walker, L.R., Whiteaker, L.D., Matson, P. A.** (1993). Nutrient limitations to plant growth during primary succession in Hawaii Volcanoes National Park. *Biogeochemistry*, 23, 197-215.
- Walker L.R. & del Moral. R.** (2008). Lessons from primary succession for restoration of severely damaged habitats. *Applied Vegetation Science*, 12, 55-67.
- Walker, L.R.** (1993). Nitrogen fixers and species replacements in primary succession. In: Miles, J. & Walton, D.W.H. (eds.) Primary succession on land. pp. 249-272. Blackwell, Oxford, UK.
- Walker, L.R., Walker, J., Hobbs, R.J.** (2007). Linking restoration and ecological succession. Springer, New York, NY, USA.
- Walker, T.W. & Syers, J. K.** (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15, 1-19.
- Werner, P.** (1984). Changes in soil properties during tropical wet forest succession in Costa Rica. *Biotropica*, 16(1), 43-50.
- Wongprom, J., Poolsiri, R., Diloksumpun S., & Ngernsaengsaruy, C.** (2020). Soil properties and tree composition in a 27-year old *Acacia mangium* Willd. Plantation on abandoned mining area at Phangnga forestry research station. *Biotropica*, 27, 125-133.