



Análisis del efecto del polvo de roca en el almacenamiento de carbono y las variables fisicoquímicas del suelo en manglares de Guayaquil, Ecuador

Analysis of the rock dust effect on carbon storage and physicochemical
soil variables in mangroves of Guayaquil, Ecuador

Harry Veintimilla* y Natalia Molina-Moreira¹

¹ Universidad Espíritu Santo. Samborombón, Guayas-
Ecuador

* Autor de correspondencia.
harryveintimilla@uees.edu.ec

RESUMEN

Una manera para reducir los gases de efecto invernadero es potencializar el almacenamiento de carbono (C) en el sedimento del manglar. Sin embargo, la contaminación ambiental no permite que los manglares cumplan su función de almacenamiento óptimo. Un bioestimulante llamado *polvo de roca* (PR) ayuda a remediar el suelo del manglar añadiendo nutrientes. Se analizó el efecto del polvo de roca en el almacenamiento de C a distintos niveles verticales en el horizonte del suelo del manglar del parque lineal Kennedy Norte en Guayaquil, donde se establecieron cuatro áreas de (25 m × 10 m) 250 m² y se aplicó 1 kg de PR por cada 10 m². Para analizar el efecto del PR en el almacenamiento de C, se recolectaron muestras de suelo a tres diferentes profundidades (0 a 0,1; 0,2 a 0,3; 0,4 a 0,5) m, durante 180 días con un periodo de muestreo de 30 días. Se realizó un análisis de varianza ANOVA de una vía, del C en comparación con la profundidad, mediante la prueba de Tukey $p < 0.05$. El C, la MO y el N incrementaron sus porcentajes en las profundidades 1 y 2, a los 90 días de aplicación, y luego se mantuvieron estables. No se registró diferencia significativa del porcentaje del C entre las profundidades 1 y 2. Se puede atribuir el incremento de los porcentajes a la época seca y al PR. En cuanto al pH, se mantuvo en un intervalo constante de valores cercanos a neutro. El NH₄ tuvo altas tasas de amonificación. Se observó un comportamiento similar en P y S debido a la descarga de efluentes contaminados y por mayor precipitación.

PALABRAS CLAVE: remediación, humedales, sedimento, bioestimulante, gases efecto invernadero, materia orgánica.

ABSTRACT

One way to reduce greenhouse gas emissions is to enhance Carbon (C) storage in mangrove sediment. However, environmental pollution hampers the optimal storage function of mangroves. A bio-stimulant named *rock dust* (RD) aids in remediating mangrove soil by adding nutrients. The effect of rock dust on C storage was analyzed vertically across the soil horizon in the Kennedy Norte Linear Park mangrove in Guayaquil. Four (25 m × 10 m) 250 m² areas were established, with 1 kg of RD applied every 10 m². To analyze the impact of RD on C storage, soil samples were collected at three different depths (0 m to 0.1 m / 0.2 m to 0.3 m / 0.4 m to 0.5 m) over 180 days, with sampling intervals of 30 days. A one-way ANOVA analysis was conducted on C in relation to depth, using the Tukey test at $p < 0.05$. Carbon (C), organic matter (OM), and nitrogen (N) percentages increased in depths 1 and 2 at 90 days after application and remained stable after that. No significant difference in C percentage between depths 1 and 2 was reported. The percentage increase can be attributed to the dry season and RD application. As for pH, it remained within a constant range of values near neutral. NH₄ exhibited high ammonification rates. Similar behavior was observed in P and S due to contaminated effluent discharge and higher precipitation.

KEYWORDS: remediation, wetlands, sediment, biostimulant, greenhouse gases, organic matter.

INTRODUCCIÓN

La concentración atmosférica de gases de efecto invernadero ha venido incrementando continuamente. El dióxido de carbono (CO₂) es el gas de efecto invernadero (GEI) más importante y se ha incrementado en 80% entre 1970 y 2004, pasando de 21 Gt a 30 Gt, lo que representa 77% de todas las emisiones de GEI (Useros, 2012). El C del suelo puede actuar como fuente o sumidero de CO₂ atmosférico reduciendo los GEI, dependiendo de las prácticas de uso de suelo, clima, textura y topografía (Zhang et al., 2007). Los suelos de los humedales almacenan por largo periodo el C por su elevado nivel freático, alta productividad y baja descomposición debido a la lenta difusión del oxígeno en estos suelos, especialmente a altas altitudes (Whiting y Chanton, 2001). El manglar es un ecosistema de humedal complejo formado principalmente por la vegetación arbórea, la fauna y la flora interrelacionadas, así como por el medio físico sobre el cual se establece (Hoff et al., 2002).

Una característica importante de los manglares es que pueden almacenar cantidades significativas de C en su biomasa (Hutchison et al., 2014); sin embargo, la mayor parte del almacenamiento de C del ecosistema se lleva a cabo en el suelo (Sanderman et al., 2018). Estos ecosistemas almacenan altas concentraciones de C por ser receptores de materia orgánica proveniente de otros ecosistemas (asociados a cuencas de ríos que llegan a la costa) y, a distintos niveles de inundación (permanentes, recurrentes, continuas), disminuye la tasa de descomposición de la materia orgánica que se deposita en el suelo, por lo que se acumula en el sitio (Nellemann et al., 2009). Una gran proporción de esta reserva de C se encuentra en el subsuelo, ya que los manglares poseen suelos ricos en materia orgánica. Es por ello que, si el suelo superficial de los manglares es perturbado, es susceptible de liberar grandes cantidades de GEI (Kauffman et al., 2013).

En Ecuador, se identifican 179 especies de plantas en el ecosistema de manglar, que se clasifican como: seis manglares mayores, dos manglares menores y seis manglares facultativos. Entre los manglares mayores, se

encuentran mangles rojos (*Rhizophora mangle*, *R. racemosa*, *R. x harrisonii*), mangles blancos (*Laguncularia racemosa* var. *Racemosa*, *Laguncularia racemosa* var. *Glabiflora*) y mangle negro (*Avicennia germinans*) (Cornejo, 2014). Se ha registrado una pérdida de aproximadamente 56 000 ha de manglar (27,6%) en un periodo de 37 años, desde 1969 hasta 2006 (Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos [Clirsén], 2007). En el año 2016, se registraron 161 835,05 ha de manglar en Ecuador (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2017).

Para la remoción de contaminantes en el sedimento, en las últimas décadas han surgido nuevas investigaciones que se han enfocado en descubrir diferentes estrategias de biorremediación. La biorremediación es un proceso biológico en el cual diversos microorganismos degradan a los contaminantes hasta compuestos no tóxicos presentes en suelo, agua o aire, trabajando de manera individual o coordinadamente mediante sinergias, dentro de un consorcio microbiano (Olguín et al., 2007). La biorremediación emplea organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), y puede realizarse *in situ* o *ex situ*, en condiciones aerobias o anaerobias (Eweis et al., 1998). De acuerdo con Salinas et al. (2007), los procesos de biorremediación de suelos se pueden clasificar en tres grupos: atenuación natural, bioestimulación y bioaumentación, todas con la posibilidad de ser aplicadas *in situ* o *ex situ*. Así como la atenuación natural (consorcios microbianos en el sedimento con la capacidad de degradar o transformar los contaminantes en subproductos, idealmente no tóxicos). La bioestimulación se basa en el uso de nutrientes y compuestos estimulantes para el crecimiento de la flora nativa. Es una técnica que estimula los microorganismos autóctonos por la circulación de soluciones a través del suelo contaminado, promoviendo así la degradación de contaminantes (Cunningham y Philip, 2000). Según Olguín et al. (2007), la estrategia de bioestimulación, mediante la adición de nutrientes y de aireación, es la mejor opción para remediar suelos de manglar y suelos en general.



Un producto natural que actúa como bioestimulante en el sedimento es el PR, obtenido a partir de rocas de diferentes canteras, las cuales son vertidas en una trituradora para lograr tener la misma granulometría. Según Knapik y Angelo (2007), el PR tiene la capacidad de suministrar al suelo macro y micronutrientes, y puede ser utilizado como fuente alternativa a la fertilización química. El PR no tiene ningún nivel de toxicidad, es el único producto en el mundo que tiene en su composición los 118 elementos de la tabla periódica, excepto los gases. Estos elementos son de alta disponibilidad nutricional y, de tal manera, el PR propicia el crecimiento geométrico de las colonias bacterianas aerobias, mientras que las colonias bacterianas patógenas desaparecen por competencia; de esta manera, las colonias purifican, desintoxican y balancean el ecosistema donde ha sido colocado el PR. A su vez, el PR genera equilibrio en el pH del suelo, la cantidad y calidad de humus, el aumento de la materia orgánica del suelo, la reserva nutricional del suelo y la resistencia de las plantas a la acción de plagas, enfermedades, sequías y heladas. Esto se debe a la mejoría de su estado nutricional, a la disminución de la dependencia de fertilizantes, pesticidas y herbicidas, cuya producción exige un elevado consumo de energía, y a su efecto residual (Melamed et al., 2007). Por lo expuesto, y considerando como hipótesis de estudio que los valores de carbono, nitrógeno (N) y materia orgánica no difieren estadísticamente entre profundidades del suelo y tampoco entre tiempos de muestreo, y que los valores de pH, NH_4 , fósforo y azufre no difieren estadísticamente entre tiempos de muestreo, se plantearon los objetivos que se presentan a continuación.

OBJETIVOS

Analizar el porcentaje de carbono, nitrógeno, relación carbono nitrógeno y materia orgánica, en relación con la profundidad en el suelo de manglar antes y después de la aplicación del polvo de roca. Como objetivo complementario, se tuvo analizar el comportamiento de variables fisicoquímicas en la superficie del suelo de manglar antes y después de la aplicación del polvo de roca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el parque lineal Kennedy Norte de la ciudad de Guayaquil, provincia del Guayas. Tiene una extensión de 21 720,45 m² con 875,40 m de longitud. Este sitio alberga una rica variedad de especies, incluyendo avifauna, reptiles y mamíferos, beneficiándose de su entorno rodeado por extensos bosques de manglares. Estos ecosistemas desempeñan un papel crucial al proporcionar servicios ecosistémicos de gran importancia para los visitantes del área. Con una superficie total de 21 720,45 m², este espacio es frecuentado por una gran afluencia de ciudadanos y turistas, especialmente durante los fines de semana (Peña, 2021). Guayaquil tiene un clima tropical húmedo con temperaturas anuales entre 22 °C y 26 °C. Las lluvias son frecuentes todo el año, concentrándose más entre diciembre y mayo, y así mismo, la humedad relativa es alta, sobre 80%. Estas variaciones se deben a las corrientes de Humboldt y El Niño (Portilla, 2018).

El Estero Salado es un ramal del mar, que tiene 60 km de longitud, forma parte del Golfo de Guayaquil y de la costa este del Pacífico en América del Sur; en este territorio se concentra 81% del ecosistema de manglares del Ecuador. El incremento poblacional de la ciudad de Guayaquil entre las décadas de los sesenta y los ochenta ocasionó un desequilibrio en el crecimiento de la urbe y sus servicios de infraestructura, especialmente el sistema de alcantarillado, ocasionando que las aguas residuales corran libremente hacia el Estero Salado. En consecuencia, se rompió el balance preexistente y se dio inicio a la creciente acumulación de materia orgánica (Lahmeyer Cimentaciones, 2000).

Según datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador [Inamhi] (2018), la precipitación media anual en Guayaquil es de alrededor de 1200 mm. Además, la ciudad está expuesta a fenómenos meteorológicos extremos, como huracanes y tormentas tropicales que pueden generar inundaciones y deslizamientos de tierra.

Como se puede observar en la figura 1, en el área de estudio se establecieron cuatro áreas (A1, A2, A3, A4) de 250 m² cada una. Para analizar las variables fisicoquímicas, con ayuda de una pala, se colectó una muestra de 1 kg de suelo mixto hasta 0,1 m de profundidad, con tres réplicas de cada área completamente al azar (Fig. 2).

Condiciones ambientales del área de estudio

El Estero Salado es un estuario de alta salinidad, Barros et al. (2020) pudieron determinar que la salinidad en el Estero Salado se encuentra en un promedio de 17,4 mg/l, con una desviación estándar de 0,5958mg/l. La salinidad disminuye conforme se aleja de la boca del estuario y puede estratificarse de acuerdo con la profundidad. Este parámetro está influenciado por la época del año, la evaporación, las escorrentías y el ciclo de mareas; y controla la distribución y tipo de biota en los ambientes estuarinos (Chapman y Wang, 2001). Los valores de salinidad en época

seca son mayores debido al bajo aporte de agua dulce y los niveles mayores de temperatura, los cuales favorecen a la evaporación del agua. Por otro lado, según el Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada [Inocar] (2020), en época húmeda los valores son menores debido a la presencia de lluvias que producen dilución en el agua, provocando un aumento en el caudal del estero. Las mareas en la zona varían su altitud desde 0,1 m hasta 4,5 m. La precipitación en la ciudad de Guayaquil durante la época seca es de 0,0 mm y durante la época lluviosa es de hasta 1,7 mm (Inamhi, 2021).

Diseño experimental

En cada área se aplicó la dosificación del PR de 1 kg por cada 10 m². La aplicación se realizó únicamente el primer día del desarrollo de la investigación, con dispersión al voleo sobre la superficie del suelo de manglar en marea baja.

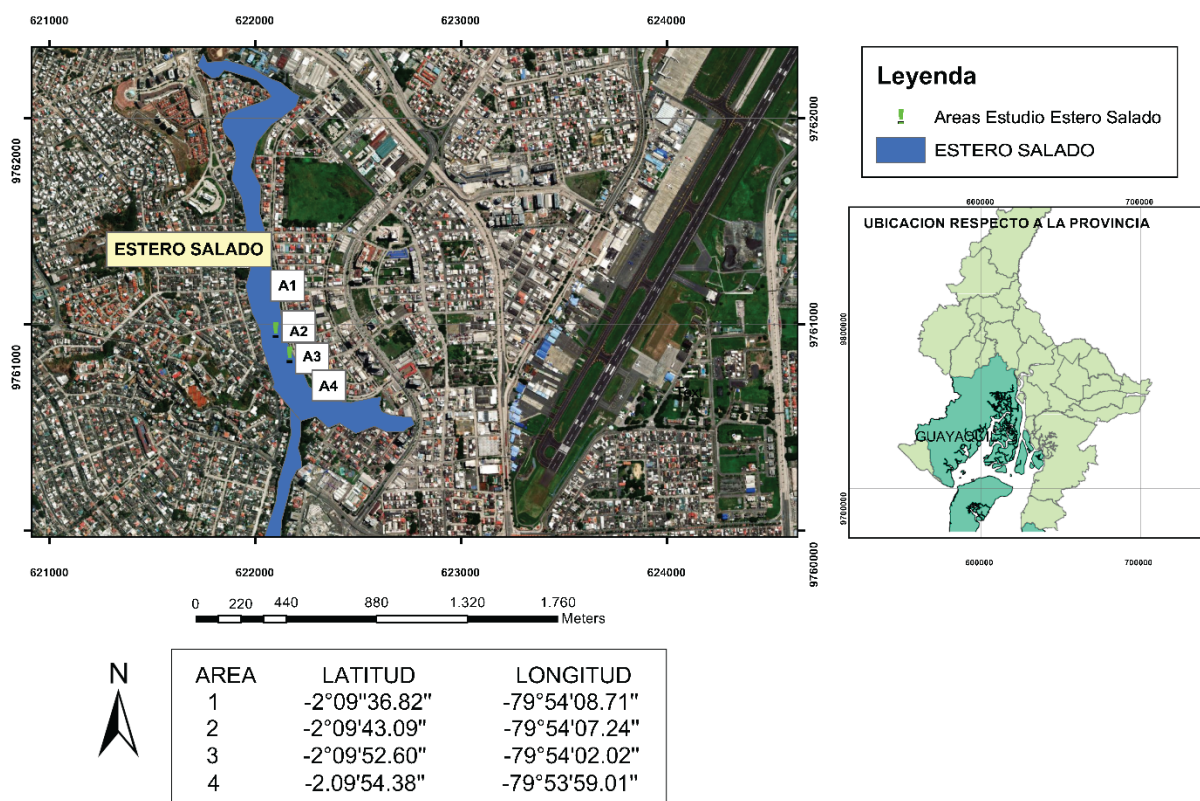
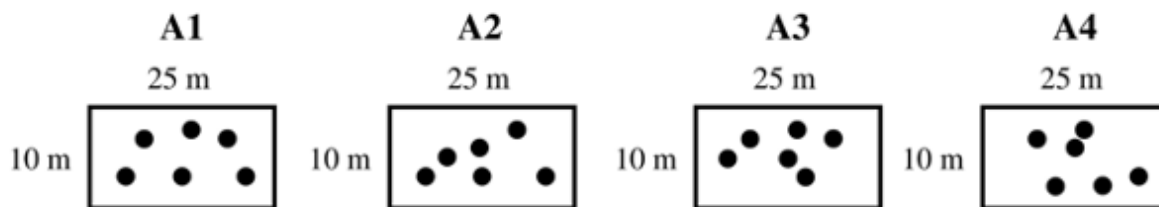


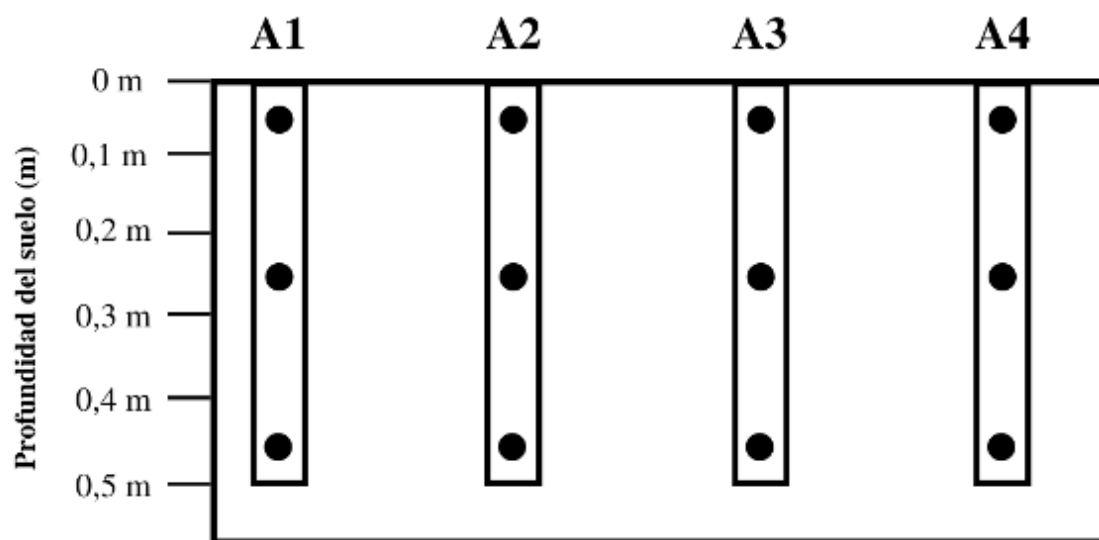
FIGURA 1. Ubicación geográfica de las áreas de estudio del Estero Salado de la ciudad de Guayaquil, provincia del Guayas.



a) Unidades de 25 m \times 10 m (250 m²) para selección aleatoria de muestras durante el estudio.



b) Recolección de muestras en tres profundidades del suelo.



c) Recolección de muestras en capa superficial del suelo para estudio de variables físicoquímicas.

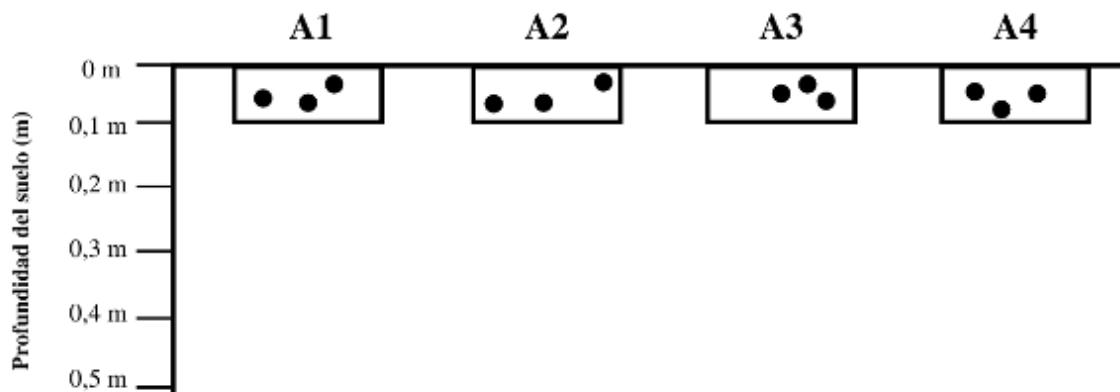


FIGURA 2. Diseño y ubicación de las muestras en el área de estudio.

Para analizar el efecto del PR en el almacenamiento de C a niveles verticales del horizonte del suelo de manglar se realizó la recolección de muestras de suelo cada 30 días durante seis meses en marea baja. Las muestras fueron recolectadas de manera aleatoria en cada área con unidades de 25 m × 10 m (Fig. 1).

Se colectaron tres muestras de suelo del horizonte a diferentes intervalos de profundidad (0 - 0,1; 0,2 - 0,3; 0,4 - 0,5) m en cada área (Fig. 3), utilizando un barreno ruso de 0,5 m de profundidad. Este muestreador consiste básicamente en un barreno de media caña que se inserta en el sedimento manualmente. La muestra queda alojada en un canalón, cerrado por una placa, que pivota sobre el eje central del cilindro, atrapando así la muestra (Fig. 3). Este dispositivo fue elaborado de manera personalizada por un soldador externo en la ciudad de Guayaquil en julio del 2020. Una vez obtenida, la muestra se colocó en un colector

de PVC en forma de canal rotulado con lugar, fecha y número de muestra, indicando la medida de 0 m y la medida de 0,5 m de profundidad. Una vez compactada, se selló y se envolvió con plástico para almacenar y transportar la muestra al Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal de la Escuela Superior Politécnica del Litoral [Espol], donde se realizó el análisis de suelo de los parámetros N, C y relación Carbono:Nitrógeno (C:N), mediante el método de combustión Dumas (Grewal et al., 1991) automatizado. Para obtener estos resultados se realizó un análisis con un equipo analizador C:N, marca Elemental y modelo Vario Macro. El equipo consta de tres tubos: reducción, combustión y post combustión, con temperaturas que van desde 800 °C hasta 960 °C. Se pesaron 120 mg de la muestra de suelo, en un papel de estaño y se colocaron en el equipo; el tiempo de análisis fue de 15 minutos.



FIGURA 3. Barreno ruso / Toma de muestra con barreno ruso.



Para obtener el porcentaje de materia orgánica (MO), se empleó el factor convencional de Vammelen, lo que supone multiplicar el porcentaje de CO por 1,724 (Cantera e Inhlénfeld, 2015). Para realizar el análisis del comportamiento de las variables fisicoquímicas en la superficie del suelo de manglar se colectaron muestras cada 30 días durante seis meses, de los cuales, cuatro fueron en época seca y tres en época de lluvia. Con una pala se colectó una muestra de 1 kg de suelo mixto, hasta 0,1 m de profundidad, con tres réplicas completamente al azar en cada área; posteriormente, se almacenó en una funda de plástico rotulada, para luego sellar y enviar al laboratorio acreditado por el Estado, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [Iniap]. Se interpretó únicamente el comportamiento de los siguientes parámetros: pH, obtenido por el método de Suelo: Agua (1:2,5); NH_4 y P, que se obtuvieron median-

te el método de colorimetría; S, por el método de turbidimetría; y textura del suelo, obtenido por el método de la pipeta.

Análisis de datos

Para el análisis y comparación de resultados, debido a que no hay diferencia significativa entre cada área y se encuentran ubicadas en el mismo sitio, se promediaron los resultados de las cuatro áreas. Posteriormente se procedió a realizar un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y pruebas de comparación múltiple del C, del N y de la MO a diferentes profundidades a partir de la dosificación del PR y las variables pH, NH_4 , P y S entre tiempos de muestreo, mediante el método Tukey al $p < 0.05$, así como un análisis de discriminante lineal con las variables C, N, C:N y MO a lo largo de los 180 días, mediante el software Rwizard (Fig. 4) (Guisande et al., 2014).

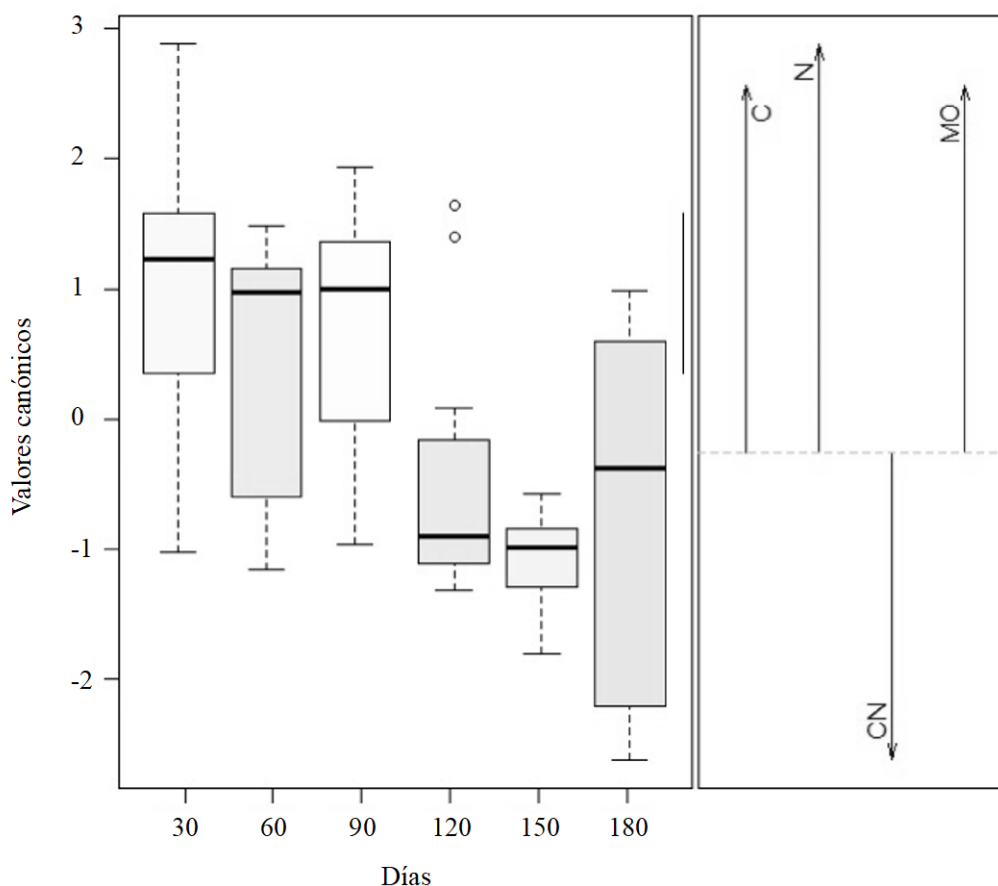


FIGURA 4. Análisis de discriminante de las variables C, N, C:N y MO a lo largo de los 180 días.

C: porcentaje de carbono; MO: porcentaje de materia orgánica; N: porcentaje de nitrógeno; C:N: relación carbono nitrógeno.

RESULTADOS

Los resultados del efecto de la aplicación del PR desde el día 0 al 180 a diferentes profundidades en el suelo del manglar se presentan en la tabla 1. Se analizaron las variables de composición de C y se calcularon los promedios de los valores de las cuatro áreas de estudio, junto con sus respectivas desviaciones estándar. No se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de C al evaluarlas. Considerando el comportamiento de cada variable en relación con la profundidad, se observó que las variables N, C y MO tienen los mayores promedios de porcentaje en la profundidad 1 (0 m - 0.1 m) hasta los 180 días, y a mayor profundidad los porcentajes disminuyen. También se ob-

servan picos en la concentración de la relación C:N en la profundidad 3 (0.4 m – 0.5 m) hasta los 180 días igualmente. Por otro lado, tomando en cuenta el comportamiento de las variables de composición de C en el tiempo, se observó que en el día 30 en las profundidades 1 (12,10%), 2 (7,77%) y 3 (5,59%) los resultados disminuyeron en comparación con el día 0 (8,50%, 4,35% y 3,71%, respectivamente), y al día 60 empezaron a aumentar (13,86%, 11,21% y 6,77%, respectivamente). Se determinó que el C, la MO y el N alcanzaron su mayor porcentaje en las profundidades 1 y 2 a los 90 días de la aplicación. A partir de los 120 días, los resultados disminuyeron, determinando que a los 180 días las variables se mantienen con valores elevados estables (Fig. 5).

TABLA 1. Efecto de la aplicación del PR desde el día 0 al 180, a diferentes profundidades en el suelo del manglar según las variables de composición de C, obteniendo un promedio de todas las áreas y su desviación estándar.

| Día | Profundidad | n | C (%) | MO (%) | N (%) | C:N |
|-----|-------------|---|--------------|---------------|-------------|---------------|
| 0 | 0 – 0,1 | 4 | 12,10 ± 2,52 | 20,82 ± 4,34 | 0,94 ± 0,27 | 13,13 ± 1,60 |
| | 0,2 – 0,3 | 4 | 7,77 ± 1,36 | 13,36 ± 2,34 | 0,44 ± 0,15 | 18,77 ± 5,34 |
| | 0,4 – 0,5 | 4 | 5,59 ± 0,98 | 9,62 ± 1,69 | 0,23 ± 0,16 | 33,74 ± 19,37 |
| 30 | 0 – 0,1 | 4 | 8,50 ± 5,86 | 14,62 ± 10,08 | 0,65 ± 0,51 | 14,35 ± 2,09 |
| | 0,2 – 0,3 | 4 | 4,35 ± 2,47 | 7,49 ± 4,24 | 0,26 ± 0,12 | 16,28 ± 2,22 |
| | 0,4 – 0,5 | 4 | 3,71 ± 1,62 | 6,39 ± 2,78 | 0,23 ± 0,12 | 17,12 ± 6,88 |
| 60 | 0 – 0,1 | 4 | 13,86 ± 2,91 | 23,89 ± 5,02 | 1,05 ± 0,36 | 14,00 ± 3,02 |
| | 0,2 – 0,3 | 4 | 11,21 ± 3,06 | 19,28 ± 5,26 | 0,77 ± 0,38 | 17,10 ± 7,12 |
| | 0,4 – 0,5 | 4 | 6,77 ± 0,40 | 11,64 ± 0,69 | 0,24 ± 0,04 | 28,86 ± 3,95 |
| 90 | 0 – 0,1 | 4 | 18,26 ± 2,45 | 31,41 ± 4,21 | 1,21 ± 0,18 | 15,19 ± 0,72 |
| | 0,2 – 0,3 | 4 | 16,43 ± 6,11 | 28,25 ± 10,51 | 1,02 ± 0,35 | 15,88 ± 0,70 |
| | 0,4 – 0,5 | 4 | 4,15 ± 1,63 | 7,13 ± 2,79 | 0,22 ± 0,06 | 19,09 ± 6,08 |
| 120 | 0 – 0,1 | 4 | 13,86 ± 2,13 | 23,85 ± 3,67 | 1,11 ± 0,16 | 12,47 ± 0,53 |
| | 0,2 – 0,3 | 4 | 13,11 ± 3,88 | 22,55 ± 6,68 | 1,03 ± 0,44 | 13,95 ± 3,63 |
| | 0,4 – 0,5 | 4 | 6,22 ± 0,91 | 10,69 ± 1,56 | 0,29 ± 0,09 | 22,57 ± 5,08 |
| 150 | 0 – 0,1 | 4 | 13,97 ± 0,99 | 24,03 ± 1,71 | 1,11 ± 0,04 | 12,56 ± 0,65 |
| | 0,2 – 0,3 | 4 | 12,75 ± 4,02 | 21,93 ± 6,91 | 0,94 ± 0,48 | 14,93 ± 3,57 |
| | 0,4 – 0,5 | 4 | 6,80 ± 0,84 | 11,70 ± 1,44 | 0,19 ± 0,05 | 37,93 ± 8,86 |
| 180 | 0 – 0,1 | 4 | 13,16 ± 1,31 | 22,63 ± 2,25 | 1,00 ± 0,12 | 13,25 ± 1,14 |
| | 0,2 – 0,3 | 4 | 10,46 ± 3,43 | 17,98 ± 5,91 | 0,43 ± 0,23 | 30,35 ± 22,42 |
| | 0,4 – 0,5 | 4 | 5,27 ± 0,87 | 9,08 ± 0,82 | 0,16 ± 0,14 | 49,62 ± 26,50 |

Profundidad : Metros de profundidad de la muestra de suelo; n : Número de réplicas; C : Porcentaje de Carbono; MO: Porcentaje de Materia Orgánica; N : Porcentaje de Nitrógeno; C:N : Concentración de Relación Carbono Nitrógeno; ± : Desviación estándar.

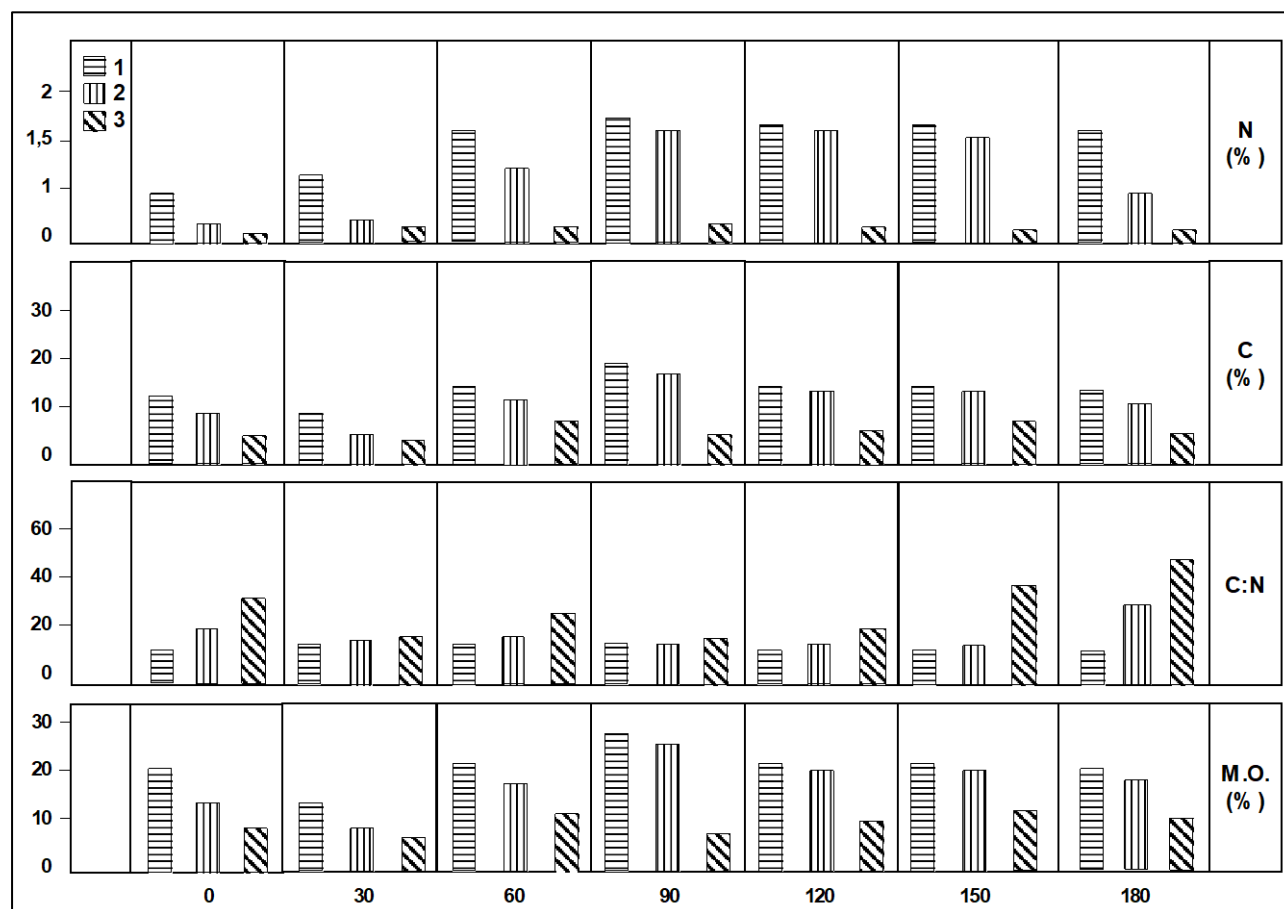


FIGURA 5. Efecto de la aplicación inicial del PR en 180 días a las profundidades 1 (0 - 0,1) m; 2 (0,2 - 0,3) m; 3(0,4 - 0,5) m en el suelo del manglar estudiado según las variables de composición de C.

C: porcentaje de carbono; MO: porcentaje de materia orgánica; N: porcentaje de nitrógeno; C:N: relación carbono nitrógeno.

Se ha observado una elevación significativa en los niveles de C, N y MO, los cuales contribuyen en gran medida a la fertilidad del suelo. Sin embargo, a partir del día 120, se ha notado una disminución en dichos valores, aunque posteriormente se ha registrado una leve recuperación hacia el día 180 (Fig. 5).

La figura 4 muestra un análisis de discriminante, el cual exhibe las variaciones temporales de las variables C, N, C:N y MO a lo largo de 180 días. Se observa una marcada disminución entre los días 90 y 120, seguida de una estabilización cercana al valor canónico 0 a los 180 días. Notablemente, la C:N se mantiene consistentemente por debajo de cero, mientras que las variables C, N y MO permanecen por encima de cero.

En el transcurso del estudio, se ha observado que el contenido de C del suelo alcanzó su máximo nivel en el día 90, pero a partir de ese momento, se ha registrado una disminución progresiva en los valores de C hasta el día 180. En los primeros 90 días, los niveles de C fueron mayores en las capas más profundas del suelo. No obstante, en el día 120 se presentó una situación atípica en la que el C alcanzó su mayor porcentaje en la superficie, superando notablemente a los valores registrados en las otras dos profundidades. En el día 150, se retomó la tendencia observada previamente, en la cual los valores de C aumentaban proporcionalmente con la profundidad del suelo. Sin embargo, en el día 180 se constató que los niveles de C disminuyen en la medida en que se profundiza en el suelo (Fig. 6).

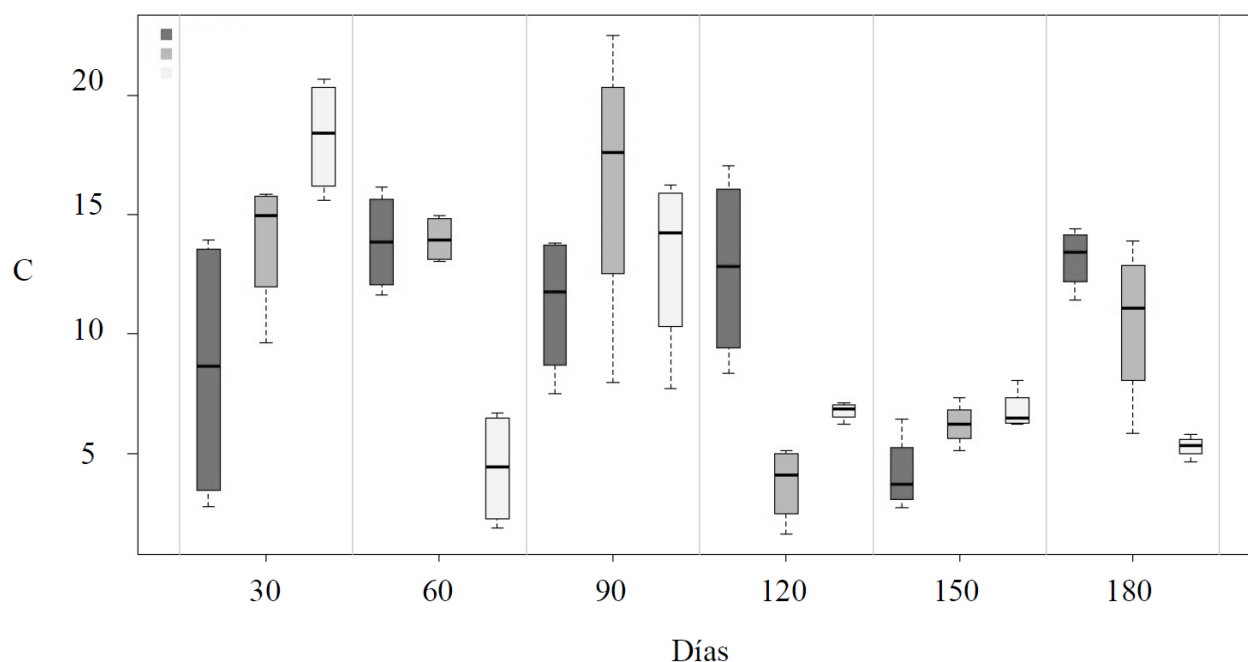


FIGURA 6. Diagrama de las diferencias significativas de la variable C entre las profundidades desde el día 30 al día 180.

Para analizar el efecto de la aplicación del PR desde el día 0 al 180, en época seca (día 0 – día 90) y época de lluvia (día 120 – día 180), se seleccionaron las variables fisicoquímicas con mayor influencia en el C, las cuales fueron promediadas en todas las áreas, y se calculó su desviación estándar (Tabla 2). Con base en los resultados obtenidos de las variables fisicoquímicas, el pH no presentó cambios significativos en sus valores en los 180 días. El NH_4 obtuvo sus valores más altos los días 30 (17,75 ppm) y 120 (18,50 ppm); sin embargo, se mantuvo en el mismo intervalo de valores. El P se incrementó considerablemente hasta el día 60 (38,50 ppm), y los siguientes días se mantuvo con valores elevados, mientras que el S igualmente alcanzó su mayor valor el día 60 (2,34 ppm); sin embargo, fue disminuyendo considerablemente hasta el día 180 (1,61 ppm). Con respecto a la clase textural, el día 0, dos áreas presentaron suelo arcilloso y, las otras dos áreas, franco-limoso, mientras que del día 30 al 180, se evidencia que tres áreas presentaron suelo franco-limosos y solo un área presentó suelo arcilloso.

DISCUSIÓN

Efecto del PR en el comportamiento de las concentraciones de composición de C en el suelo

Los promedios de porcentaje de las variables C y MO son mayores en la profundidad 1 y presentan un comportamiento similar. Esto se debe a que, según lo mencionado por Martínez, et al. (2008), el C es el principal componente de la MO, por lo que es común que ambos tengan una relación en sus porcentajes. Además, Chen, et al. (2017) señalan que en la superficie del suelo se produce una mayor captura de componentes orgánicos que permiten el abastecimiento de nutrientes, lo que se traduce en un mayor contenido de MO y, por ende, una mayor concentración de C.

En los primeros 90 días (época seca) las variables C, N, MO tuvieron resultados altos, luego disminuyeron y se mantuvieron con valores estables hasta los 180 días. Se puede interpretar que, en la época seca, al tener los mayores porcentajes de las variables, se convalida lo mencionado por Organización de las Naciones Unidas Para La



Agricultura y la Alimentación [FAO, por sus siglas en inglés] (2002), que sugiere que existen grandes diferencias en el almacenamiento del C orgánico en relación con la lluvia. Al ser el PR un bioestimulante, se le puede atribuir el aumento de porcentajes de las variables de composición de C con base en lo mencionado por Enciso-Garay, (2016), que dice que la aplicación del mismo promueve aumentos significativos en la cantidad de nutrientes del suelo. El N, al tener un mayor porcentaje en la superficie, indica que la asimilación e incorporación metabólica del N por parte de los microorganismos es rápida, ocurriendo la mineralización simultánea de los compuestos carbonados y descomposición o ruptura de los tejidos; es decir, mayores porcentajes de C y MO (Núñez Solís, 2000). La relación C:N, al tener una mayor concentración a mayor profundidad, indica que existe una mayor descomposición de MO, debido a que cuando se descomponen los residuos orgánicos, proveen energía para los microorganismos y el

N pasa a constituir nuevas células de los microorganismos del suelo (Arias, 2018).

En Nuevo Campechito, localizado en la Península de Atasta, México, zona con una considerable contaminación por derrames de petróleo, se evaluó la capacidad de almacenamiento de C en época seca y de lluvia a diferentes profundidades en el suelo del manglar. Se obtuvo que el C en época seca tiene un porcentaje de 5,13 a una profundidad de 0 m - 0,3 m, y 6,89 a una profundidad de 0,3 m - 0,6 m, teniendo un mayor almacenamiento de C a mayor profundidad (Sánchez-Junco, 2011). Esa conclusión de comportamiento de C es similar a la conclusión del presente artículo. Otro estudio en Tabasco, México, realizado por Granados-Puerto et al. (2017) también evidencia que el porcentaje más alto de C fue en época seca con 12,1% a una profundidad de 0 m - 0,15 m, en sedimentos de la laguna costera, la cual se encuentra contaminada por las poblaciones humanas asentadas alrededor de la laguna e industrias petroleras aledañas.

TABLA 2. Efecto de la aplicación del PR desde el día 0 al 180, según las variables fisicoquímicas, obteniendo un promedio de todas las áreas y su desviación estándar.

| <i>Variables</i> | <i>pH</i> | <i>NH₄ (ppm)</i> | <i>P (ppm)</i> | <i>S (ppm)</i> | <i>Clase Textural</i> |
|------------------|-------------|-----------------------------|----------------|----------------|-----------------------|
| n | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Día 0 | 6,45 ± 0,42 | 11,25 ± 1,50 | 13,50 ± 5,74 | 0,71 ± 0,04 | Arcilloso (2/4) |
| Día 30 | 6,48 ± 0,51 | 17,75 ± 7,63 | 28,00 ± 7,87 | 1,91 ± 0,19 | Franco-Limoso (3/4) |
| Día 60 | 6,28 ± 0,62 | 12,50 ± 3,32 | 38,50 ± 14 | 2,34 ± 0,92 | Franco-Limoso (3/4) |
| Día 90 | 6,23 ± 0,62 | 12,75 ± 2,06 | 25,75 ± 9,95 | 1,59 ± 0,11 | Franco-Limoso (3/4) |
| Día 120 | 6,80 ± 0,50 | 18,50 ± 2,65 | 31,00 ± 9,49 | 1,24 ± 0,11 | Franco-Limoso (3/4) |
| Día 150 | 6,43 ± 0,49 | 10,25 ± 2,63 | 39,75 ± 15 | 1,77 ± 0,08 | Franco-Limoso (3/4) |
| Día 180 | 6,93 ± 0,22 | 12,50 ± 6,35 | 37,25 ± 21 | 1,61 ± 0,24 | Franco-Limoso (3/4) |

Se presentan valores promedio y desviaciones estándar.

n : número de réplicas; pH : potencial de hidrógeno; NH₄ : partes por millón de amonio; P : partes por millón de fósforo; S : partes por millón de azufre; Clase Textural: clase textural predominante de las 4 áreas; arcilloso 2/4: Dos áreas con textura arcillosa y dos con textura franco-limoso; Franco-Limoso 3/4: Tres áreas con textura franco-limoso y un área con textura arcillosa; Día: cantidad de días transcurridos a partir de la aplicación del PR.

El manglar del parque lineal Kennedy Norte de Guayaquil, a pesar de verse afectado por la gran contaminación de la urbe aledaña, presenta un alto porcentaje de carbono en su sedimento en comparación con otros manglares contaminados. Se observa un incremento significativo en el porcentaje de carbono durante la época seca y a los 90 días de la aplicación del PR en el sedimento. Este incremento puede atribuirse a la época seca y al uso del PR, según lo mencionado por Melamed et al. (2007). Estos autores indican que la aplicación del PR tiene un efecto positivo en el aumento de la MO del suelo.

Efecto del PR en el comportamiento de las concentraciones de las variables fisicoquímicas en el suelo

El pH se mantuvo en un intervalo constante de valores cercanos a neutro, obteniendo el mínimo al día 90 (6,23) y el máximo al día 180 (6,93), lo cual repercute en las demás variables y genera que los nutrientes sean absorbidos de mejor manera y puedan crecer y desarrollarse con mayor facilidad (Ibáñez, 2007). En comparación, Agudelo (2015), determinó en manglares con alteración antropogénica en la Bahía de Cispatá, Colombia valores de pH con un mínimo de 4,32 y un máximo de 5,11.

El predominio de NH_4 a los 30 y 120 días en los suelos de manglar refleja altas tasas de amonificación en relación con otros procesos de transformación de N (Fernandes et al., 2010). Los altos niveles de fósforo (P) encontrados en el área de estudio se deben principalmente al aumento de la precipitación. Además, se observaron intervalos significativos de P debido a los diferentes drenes agrícolas, los efluentes de las camaroneras y las descargas de la población (Chalen, 2011). En los manglares de Marismas Nacionales de Nayarit, el contenido de C es directamente proporcional al contenido de S en el suelo, de tal manera que, al incrementar el S, se espera un alto contenido de carbono en el manglar (Arias, 2018). Este mismo patrón se observó entre S y MO. Al aumentar significativamente los niveles de S en el suelo superficial, se puede constatar que la mayor parte del S en los suelos se encuentra en la MO. Por lo

tanto, los suelos con mayor contenido de MO y C presentarán una mayor disponibilidad de S.

En cuanto a la clase textural del suelo superficial, se encontró que, en dos de las cuatro áreas de muestreo, al inicio del estudio (día 0), el suelo presentaba una textura arcillosa, lo que implica una mayor retención de MO en comparación con los suelos franco-limosos (Jenkinson, 1988). Entre los días 30 y 180 de estudio, predominó la textura franco-limosa en el área de estudio, pero esto no tuvo un efecto significativo en la composición del C.

CONCLUSIONES

El almacenamiento de carbono a distintos niveles verticales del horizonte del suelo del manglar tuvo diferencias significativas tanto a nivel de profundidad como a través del tiempo a partir de la aplicación del PR. En la época seca y luego de haber aplicado el PR en el sedimento, se incrementaron los niveles de C, MO y N, dándole un mayor almacenamiento de C, y en la época de lluvia los valores se mantuvieron estables.

Al analizar los resultados de las variables fisicoquímicas en la superficie del suelo del manglar en relación con el tiempo, se pudo notar que el pH se mantuvo en un intervalo constante de valores cercanos a neutro, en comparación con otros estudios de manglares. El NH_4 tuvo altas tasas de amonificación en relación con otros procesos de transformación de N. Se observó un comportamiento similar en el P y S debido a la descarga de efluentes contaminados y por mayor precipitación.

Los resultados obtenidos en este estudio indican diferencias estadísticas significativas en los valores de carbono, nitrógeno y materia orgánica entre las diferentes profundidades del suelo y entre los diferentes tiempos de muestreo. Por lo tanto, la hipótesis nula de que no existen diferencias significativas en estas variables es rechazada. En cuanto a las variables fisicoquímicas, los resultados no proporcionan suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los valores no difieren estadísticamente entre los diferentes tiempos de muestreo.



Para que se pueda realizar una adecuada comparación del almacenamiento de carbono del suelo del manglar, se recomienda que se contemple el suelo del mismo manglar, pero en otra ubicación, con el objetivo de conocer la factibilidad del efecto del PR en el suelo del manglar y, de tal forma, realizarlo durante un año para poder evaluar el comportamiento de las variables en toda la época seca y toda la época de lluvia. En este proyecto de investigación se determinó únicamente el porcentaje de C en el suelo, por lo cual se recomienda, para futuras investigaciones, calcular las reservas de C en el suelo y en el ecosistema. Se tuvo limitación para la claridad y homogeneidad de los resultados de las muestras, debido a que se analizaron las muestras en dos laboratorios diferentes.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el proyecto “*Manglares del Ecuador: un estudio integrado entre la academia y los saberes ancestrales 2019-2021*”, financiado por el Centro de Investigaciones de la Universidad Espíritu Santo – Ecuador. Al Ing. Patricio Schwarz por donar y asesorar técnicamente sobre el uso del polvo de roca. A la Muy Ilustre Municipalidad de Guayaquil por su aporte en el análisis de muestras en laboratorio.

REFERENCIAS

- Agudelo, C., Bolívar J., Polanía, J., Urrego, L., Yepes, A., & Sierra, A. (2015). Estructura y composición florística de los manglares de la bahía de Cispata, Caribe colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 63(4), 1137-1147.
- Arias, X. (2018). *Carbono, nitrógeno y azufre en manglares de Paraíso Tabasco* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo].
- Barros, D., Castro, D., & Pino, S. (2020). Calidad de agua del estero salado y su incidencia en la fauna acuática, sector La Chala - Guayaquil. *Journal of Applied Chemistry*, 13(3), 18-24.
- Cantera, B., & Inhlénfeld, S. (2015). *Efecto de la fertilización y aplicación de bioestimulantes en el desarrollo inicial de plantaciones de Eucalyptus globulus sobre suelos de Lavalaja* [Tesis de licenciatura, Universidad de la República].
- Chalen, F. (2011). Distribución del contenido de fósforo y carbón del sedimento del litoral costero ecuatoriano durante octubre del 2003. *Revista de Ciencias del Mar y Limnología*, 5(1), 51-64.
- Chapman, P., & Wang, F. (2001). Assessing Sediment Contamination in Estuaries. *Annual Review Environmental Toxicology and Chemistry*, 20(1), 3-22. <https://doi.org/10.1002/etc.5620200102>
- Chen, G., Azkab, M. H., Chmura, G. L., Chen, S., Sastrosuwondo, P., Ma, Z., Dharmawan, I. W. E., Yin, X., & Chen, B. (2017). Mangroves as a major source of soil carbon storage in adjacent seagrass meadows. *Scientific Reports*, 7(1), 42406. <https://doi.org/10.1038/srep42406>
- Centro de Levantamientos Integrados de Recursos por Sensores Remotos [Clirsén] (2007). *Actualización del estudio multitemporal de los manglares, camaronerías y áreas salinas de la costa ecuatoriana*. Centro de Levantamientos Integrados de Recursos por Sensores Remotos.
- Cornejo, X. (2014). *Plants of South American Pacific Mangrove Swamps (Colombia, Ecuador, Peru)*. Universidad de Guayaquil.
- Cunningham, C., & Philip, J. (2000). Comparison of bioaugmentation and biostimulation in ex situ treatment of diesel contaminated soil. *Land Contamination and Reclamation*, 8(4), 261-269. <https://doi.org/10.2462/09670513.575>
- Enciso-Garay, C. R., Duarte Alvarez, O., Abrahám Bogado, G., & Santacruz, V. R. (2016). Dosis de polvo de roca y sus efectos sobre el rendimiento del tomate. *Revista Verde de Agroecología e Desenvolvimento Sustentável*, 11(1), 37-42. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v11i1.3998>
- Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P., & Schoroder, E. D. (1998). *Bioremediation Principles*. McGraw-Hill International Editions.
- Fernandes, S. O., Loka P. A., Bonin P. C., & Michotey, V. (2010). Denitrification: An important pathway for nitrous oxide production in tropical mangrove sediments (Goa, India). *Journal of Environmental Quality*, 39(4), 1507-1516. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0477>
- Granados-Puerto, S., Valdés-Lozano, D., & Real-De León, E. (2017). Carbono orgánico en sedimentos de la laguna costera El Yucateco, Tabasco, México, procesos de transformación del nitrógeno. En F. Paz, R. Torres, & A. Velázquez (Eds.), *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2017. Serie Síntesis Nacionales* (pp. 203-206). Programa Mexicano del Carbono - Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada - Universidad Autónoma de Baja California.
- Grewal, K. S., Buchan, G. D., & Sherlock, R. R. (1991). A comparison of three methods of organic carbon determination in some New Zealand soil. *Journal of Soil Science*, 42(2), 251-257. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1991.tb00406.x>
- Guisande, C., Heine J., González-DaCosta, J., & García-Roselló, E. (2014). *RWizurd Software*. University of Vigo.

- Hoff, R., Hensel, P., Proffitt, E., Delgado, P., Shigenaka G., Yender R., & Mearns, A. J. (2002). *Oil Spills in mangroves. Planning & Response Considerations*. National Oceanic and Atmospheric Administration - National Ocean Service - Office of Response and Restoration
- Hutchison, J., Manica, A., Swetnam, R., Balmford, A. & Spalding, M. (2014). Predicting global patterns in mangrove forest biomass. *Conservation Letters*, 7(3), 233-40. <https://doi.org/10.1111/conl.12060>
- Ibáñez, J. (2007). *pH del suelo*. Fundación por el conocimiento Madrid. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/04/02/62776>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador [Inamhi] (2018). *Boletín climatológico de Guayaquil*. <https://www.inamhi.gob.ec/meteorologia/bolhist/GUAYAQUIL/DIARIO/2018/ENERO/BOLETIN%20METEOROLOGICO%20DE%20GUAYAQUIL%2012%20ENERO%202018.pdf>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador [Inamhi] (2021). *Boletín climatológico de Guayaquil*. Inamhi. <https://www.inamhi.gob.ec/meteorologia/bolhist/GUAYAQUIL/DIARIO/2021/ENERO/BOLETIN%20METEOROLOGICO%20GUAYAQUIL%2021%20DE%20ENERO%20DE%202021.pdf>
- Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada [Inocar] (2020). *Datos de precipitación en Guayaquil*. Inocar. https://www.inocar.mil.ec/graphs/src/inocar/ptndiario_hc.php?mq=01&yact=2020
- Jenkinson, D. S. (1988). Soil organic matter and its dynamics. En A. Wild (Ed.), *Russel soil conditions and plant growth* (11a ed., pp. 564-607). Longman.
- Núñez Solis, J. (2000). *Fundamentos de edafología*. Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Kauffman, J., Donato, D., & Adame, M. (2013). *Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares*. Documento de Trabajo 117. CIFOR.
- Knapik, J. G., & Angelo, A. C. (2007). Crescimento de mudas de *Prunus sellowii* Koehne em resposta a adubações com NPK epó de basalto. *Floresta, Curitiba*, 37(2), 257-264.
- Lahmeyer Cimentaciones (2000). *Estudios de prefactibilidad y selección de la mejor alternativa del plan integral de la recuperación del estero salado, Guayaquil*. Lahmeyer Cimentaciones.
- Melamed, R.; Gaspar, J.; & Miekeley, N. (2007) *Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais*. Série Estudos e Documentos CETEM/MCT.
- Ministerio del Ambiente de Ecuador (2017). *Guía de deberes y derechos de las organizaciones custodias del manglar*. Ministerio del Ambiente del Ecuador - Conservación Internacional Ecuador - Instituto Humanista para la Cooperación con los Países en Desarrollo - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura para el Medio Ambiente Mundial.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdes L., de Young C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (2009). *Blue carbon: a rapid response assessment*. United Nations Environment Programme. <https://digitallibrary.un.org/record/673428>
- Olguín, E., Hernández, M., & Sánchez, G. (2007). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 23(3), 139-154.
- Organización de las Naciones Unidas Para La Agricultura y la Alimentación [FAO] (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. FAO
- Peña, R. (2021). Fenología de los mangles rojos (*Rhizophora mangle* y *R. racemosa*) en la ciudad de Guayaquil, Ecuador [Tesis de licenciatura, Universidad de Guayaquil].
- Portilla, F. (2018). *Agroclimatología del Ecuador* (1a ed.). Universidad Politécnica Salesiana
- Salinas, A., Santos, M., Soto, O., Delgado, E., Pérez, H., Haúad, L. A., & Medrana, H. (2007). Development of a bioremediation process by biostimulation or native microbial consortium through the heap leaching technique. *Journal Environment Management*, 88(1), 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.038>
- Sanderman, J., Hengl, T., Friskel, G., Solvik, K., Adame, M. F., Benson, L., Bukoski, J., Carnell, P., Cifuentes-Jara, M., Donato, D., Duncan, C., Eid, E., Ermgassen, P., Ewers Lewis, C., Macreadie, P., Glass, L., Gress, S., Jardine, S., Jones, T., ..., & Landis, M. (2018). A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. *Environmental Research*, 13(5), 055002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabe1c>
- Sánchez-Junco, R. C., Damián-Hernández, D. L., Cerón-Bretón, R. M., Cerón-Bretón, J. G., Guerra-Santos, J. J., Rangel-Marrón, M., & Zavala-Loría, J. C. (2011). Determinación del carbono almacenado en suelo con asociación de mangle rojo en Nuevo Campechito, Campeche. *Unacar Tecnociencia*, 5(1), 1-7. <https://biblat.unam.mx/hevila/UNACARtecnociencia/2011/n01/1.pdf>
- Useros, J. (2012). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. *Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71-98.



Whiting, J. G., & Chanton, J. P. (2001). Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 53(5), 521-528. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v53i5.16628>

Zhang, H. B., Lou, Y. M., Wong, M. H., Zhao, Q. G., & Zhang, G. L. (2007). Soil Organic Carbon storage and change with reduction in agricultural activities in Hong Kong. *Geoderma*, 139(3-4), 412-419. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.03.003>

Manuscrito recibido el 20 de diciembre de 2021

Aceptado el 31 de mayo de 2023

Publicado el 20 de diciembre de 2023

Este documento se debe citar como:

Veintimilla, H., & Molina-Moreira, N. (2023). Análisis del efecto del polvo de roca en el almacenamiento de carbono y las variables fisicoquímicas del suelo en manglares de Guayaquil, Ecuador. *Madera y Bosques*, 29(3), e2932455. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2932455>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.