



Flujo de CO₂ en suelos de ecosistemas naturales y agroforestales de la provincia de Manabí, Ecuador

CO₂ flux in soils from natural and agroforestry ecosystems of the province of Manabí, Ecuador

Fluxo de CO₂ em solos de ecossistemas naturais e agroflorestais da província de Manabí, Equador

Autor

✉ Erika Jacqueline Demera Demera¹
edemera3283@utm.edu.ec



✉ Emilio José Jarre Castro¹
emilio.jarre@utm.edu.ec



✉ Ezequiel Zamora Ledezma^{2*}
ezequiel.zamora@utm.edu.ec



¹Programa de Maestría en Agroecología y Cambio Climático. Facultad de Posgrado. Universidad Técnica de Manabí. Avenida José María Urbina, Portoviejo, EC130105, provincia Manabí, Ecuador.

²Grupo de Investigación Funcionamiento de los Ecosistemas y Cambio Climático. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. Santa Ana, Lodana 13132, provincia Manabí, Ecuador.

* Autor para correspondencia.

Editor Académico

Ronald Oswaldo Villamar-Torres



Citación sugerida: Demera Demera, E. J., Jarre Castro, E. J., Zamora Ledezma, E. Z., (2025). Flujo de CO₂ en suelos de ecosistemas naturales y agroforestales de la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Bases de la Ciencia*, 10(2), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v10i2.7129>

Recibido: 18/11/2024
Aceptado: 28/02/2025
Publicado: 01/05/2025

Resumen

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) edáfico, fundamentales en el ciclo global de carbono, fueron evaluadas en dos Bosques Secos Tropicales (BST1 y BST2) y un sistema Agroforestal (AF1) para identificar diferencias entre ellos y analizar la influencia de factores edáficos y meteorológicos. Las mediciones de CO₂ edáfico se realizaron en dos bloques para cada sistema, junto con parámetros como pH, conductividad eléctrica, humedad del suelo, temperatura y presión atmosférica. Los resultados mostraron que el BST1 tuvo las mayores emisiones (0,711-0,806 g CO₂ m⁻² h⁻¹), seguido del BST2 (0,482- 0,505 g CO₂ m⁻² h⁻¹), mientras que el AF1 presentó los valores más bajos (0,309-0,361 g CO₂ m⁻² h⁻¹), sin diferencias significativas entre los bloques dentro de cada sistema. Las correlaciones indicaron que el CO₂ edáfico se relaciona positivamente con la humedad del suelo (r = 0,50) y la conductividad eléctrica (r = 0,43), y negativamente con la presión atmosférica (r = -0,76) y el pH (r = -0,61). Esto sugiere que las mayores emisiones en el BST1 están asociadas a una mayor actividad biológica y descomposición, mientras que los menores valores en el AF1 reflejan el efecto mitigador de los sistemas agroforestales. Estos hallazgos resaltan la influencia combinada de las características edáficas y meteorológicas sobre las emisiones de CO₂ en diferentes sistemas ecológicos.

Palabras clave: bosque seco tropical, cambio climático, CO₂ edáfico, respiración del suelo.

Abstract

Edaphic carbon dioxide (CO₂) emissions, fundamental in the global carbon cycle, were evaluated in two Tropical Dry Forests (TDF1 and TDF2) and one Agroforestry system (AF1) to identify differences between them and to analyze the influence of edaphic and meteorological factors. Edaphic CO₂ measurements were carried out in two blocks for each system, together with parameters such as pH, electrical conductivity, soil moisture, temperature and atmospheric pressure. The results showed that BST1 had the highest emissions (0,711-0,806 g CO₂ m⁻² h⁻¹), followed by BST2 (0,482- 0,505 g CO₂ m⁻² h⁻¹), while AF1 presented the lowest values (0,309-0,361 g CO₂ m⁻² h⁻¹), with no significant differences between blocks within each system. Correlations indicated that edaphic CO₂ is positively related to soil moisture (r = 0.50) and electrical conductivity (r = 0.43), and negatively related to atmospheric pressure (r = -0.76) and pH (r = -0.61). This suggests that higher emissions in BST1 are associated with higher biological activity and decomposition, while lower values in AF1 reflect the mitigating effect of agroforestry systems. These findings highlight the combined influence of edaphic and meteorological characteristics on CO₂ emissions in different ecological systems.

Keywords: tropical dry forest, climate change, edaphic CO₂, soil respiration.

Resumo

As emissões de CO₂ edáfico, fundamentais no ciclo global do carbono, foram avaliadas em duas Florestas Tropicais Secas (FTS1 e FTS2) e um sistema Agroflorestal (AF1) para identificar diferenças entre eles e analisar a influência de fatores edáficos e meteorológicos. As medições de CO₂ edáfico foram efetuadas em dois blocos para cada sistema, juntamente com parâmetros como o pH, a condutividade elétrica, a umidade do solo, a temperatura e a pressão atmosférica. Os resultados mostraram que o FTS1 teve as maiores emissões (0,711-0,806 g CO₂ m⁻² h⁻¹), seguido pelo FTS2 (0,482- 0,505 g CO₂ m⁻² h⁻¹), enquanto o AF1 teve os valores mais baixos (0,309-0,361 g CO₂ m⁻² h⁻¹), sem diferenças significativas entre os blocos dentro de cada sistema. As correlações indicaram que o CO₂ edáfico está positivamente relacionado com a umidade do solo (r = 0,50) e a condutividade elétrica (r = 0,43), e negativamente relacionado com a pressão atmosférica (r = -0,76) e o pH (r = -0,61). Isto sugere que emissões mais elevadas em FTS1 estão associadas a uma maior atividade biológica e decomposição, enquanto valores mais baixos em AF1 refletem o efeito atenuante dos sistemas agroflorestais. Estes resultados realçam a influência combinada das características edáficas e meteorológicas nas emissões de CO₂ em diferentes sistemas ecológicos.

Palavras-chave: floresta tropical seca, mudanças climáticas, CO₂ edáfico, respiração do solo.





INTRODUCCIÓN

En la actualidad el calentamiento global amenaza de manera inminente a la dinámica global en todos sus sectores producto del aumento de gases de efecto invernadero que absorben y reemiten gran parte de la radiación infrarroja reflejada por la superficie terrestre, con el consecuente incremento de la temperatura global (Valverde *et al.*, 2022) y efectos negativos sobre el desarrollo económico, la vida del hombre y el medio ambiente. El dióxido de carbono (CO_2) constituye el gas principal de efecto invernadero (GEI) que provoca el calentamiento global, por tanto, también induce al cambio climático y ambiental (Rosales, 2022). Al respecto, se conoce que las emisiones excesivas de CO_2 originan aumento de los problemas naturales y sociales, el derretimiento del hielo, el aumento del nivel del mar y pérdida de biodiversidad, representando una amenaza para la vida humana. (Fernández, 2017)

Aunque las actividades antropogénicas son las principales responsables del incremento de la concentración de los GEI en la atmósfera, incluyendo el CO_2 , los procesos de respiración del suelo también contribuyen en gran medida al aumento de gases de efecto invernadero (Sosa-Rodrigues & García-Vivas, 2019; Valverde *et al.*, 2022). La respiración del suelo indica la producción total de CO_2 por unidad de área y tiempo, procedente de raíces, micorrizas, respiración de organismos edáficos y oxidación de compuestos de carbono (Abarca & Zumba, 2021), constituyendo la fuente principal de carbono emitida por la superficie del suelo y uno de los componente esenciales del ciclo del carbono en los ecosistemas terrestres (Valverde *et al.*, 2022), por tal motivo, es un parámetro útil para analizar la calidad de los suelos. (Belmonte, 2019)

La tasa de respiración del suelo es afectada por diversas variables. El tipo de vegetación puede incidir en el flujo de CO_2 edáfico por su efecto en la actividad de las raíces y la cantidad y calidad de la hojarasca presente en el suelo (García *et al.*, 2022). Igualmente, actividades como el manejo de los residuos forestales, la tala y otras de tipo antropogénica inciden significativamente sobre los flujos de CO_2 emitidos desde el suelo a la atmósfera, modificando así el contenido de carbono de los ecosistemas forestales que incide grandemente en el cambio climático. También tienen influencia las variables ambientales como la humedad relativa, temperatura del aire y los cambios locales de presión producidos por el desplazamiento volumétrico de la lluvia o el viento (Valverde *et al.*, 2022). En este sentido, bajo el contexto del cambio climático, los estudios de flujos de CO_2 del suelo desempeñan un rol importante debido a los efectos del calentamiento global, que puede alterar la composición de las especies forestales y en consecuencia, la respiración del suelo por modificación del régimen de precipitaciones y temperaturas. (García *et al.*, 2022)

Los Bosques Secos Tropicales son biomas con diversos servicios ecosistémicos y alto número de especies endémicas (Ramírez-Huila *et al.*, 2023) y pueden contribuir a mitigar el cambio climático por el almacenamiento de gran cantidad de carbono en los troncos, necromasa, ramas, raíces, hojas y suelo (Fernández, 2017). Al respecto, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2015), sostiene que los bosques capturan más de 650000 millones de toneladas de carbón, que representa casi un tercio de la totalidad de los ecosistemas terrestres. En este sentido, uno de los desafíos actuales más grandes para la conservación ambiental y disminuir los efectos del cambio climático, es la exploración y protección de los bosques secos tropicales (Powers, 2019), que implica la adecuada gestión forestal, la reducción de la tala y la recuperación de áreas boscosas (Ramírez-Huila *et al.*, 2023), así como también conocer la cantidad de carbono emitida a la atmósfera. (Fernández, 2017)

Ecuador dispone de una gran diversidad biológica y tipos de clima, entre ellos, los bosques tropicales y andinos (Rosillo *et al.*, 2020), ecosistemas de gran potencial para proveer bienes y servicios ambientales, restaurar funciones ecosistémicas y contribuir a la mitigación del cambio climático, sin embargo, son muy vulnerables y frágiles a los efectos combinados de la deforestación, degradación y el mismo cambio climático (Ramírez & Ayoví, 2023). Los bosques secos de Ecuador son poco conocidos, aunque son muy importantes para la economía de la población rural por el suministro de productos maderables y no maderables, usados para la venta y el uso particular.

Estos se encuentran actualmente muy amenazados por el indiscriminado uso ganadero y agrícola, la reducción de la cobertura vegetal por deforestación, fragmentación y el impacto del cambio climático (Riofrio, 2018), generando situaciones negativas para la comunidad vegetal, el desarrollo y la sostenibilidad. (Ramírez-Huila et al., 2023)

La provincia de Manabí, ubicada en la región Costa de Ecuador, es una de las provincias con mayor superficie del país donde ocupa un área geográfica de 18.780 km². Se caracteriza por un clima subtropical que varía entre seco y húmedo, humedad relativa de 76,2% promedio anual (Intriago-García & Pacheco-Gil., 2022) y temperatura de 25°C promedio anual (Ostaiza Demera et al., 2020), posee una destacada actividad agropecuaria (Intriago-García & Pacheco-Gil., 2022). La ganadería y la agricultura y los largos periodos de sequía sufridos por la región en décadas pasadas, han afectado gravemente los hábitats naturales de esta provincia. (Almendariz et al., 2012)

El estudio presente tiene como objetivo contrastar el flujo de CO₂ en suelos de la provincia de Manabí, Ecuador, en un ecosistema natural y un sistema agroforestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio fue desarrollado en los cantones Santa Ana y Manta de la provincia de Manabí, Ecuador. El cantón Santa Ana se encuentra ubicado al sur de Manabí y se caracteriza por un clima tropical seco con temporadas de lluvia y sequía, formaciones montañosas y diversos recursos forestales y acuíferos. Su actividad agropecuaria es variada: arroz, maíz, cacao, café, yuca, hortalizas y ganado vacuno, destinados al consumo local y provincias vecinas (Ostaiza et al., 2020).

El cantón Manta ocupa 292,89 km² de extensión en el suroeste de la provincia de Manabí y es muy importante por su papel como centro comercial, pesquero, turístico e industrial en la provincia (Reinoso et al., 2021). Posee un clima subtropical desértico fuertemente influenciado por las corrientes frías de Humboldt y cálidas de Panamá y las condiciones orográficas con montañas: La altitud del cantón varía entre 0 y 200 msnm, las temperaturas entre 23°C y 26°C y la precipitación media anual oscila entre 200 y 500 mm. (Andrade & Hernández, 2010)

El Refugio de Vida Silvestre Marino Costera Pácora se ubica en la costa central de Ecuador, dentro del cantón Manta. Alterna bosques secos con bosques ligeramente húmedos, poco común en la región, con variedad de especies vegetales y animales adaptadas a las condiciones de los dos tipos de bosques.

Ecosistemas evaluados

Se estudiaron tres ecosistemas, seleccionados según las características físico-naturales contrastantes, seguridad en las zonas, facilidades logísticas de acceso y monitoreo rápido: bosque seco tropical (BTS1), ubicado en el Refugio de Vida Silvestre Marino Costera Pácora, cantón Manta; bosque seco tropical (BTS2), ubicado en los predios de la Universidad Técnica de Manabí, campus Lodana del cantón Santa Ana y ecosistema agroforestal (AF1), de la finca La Germania, cantón Santa Ana (figura 1).

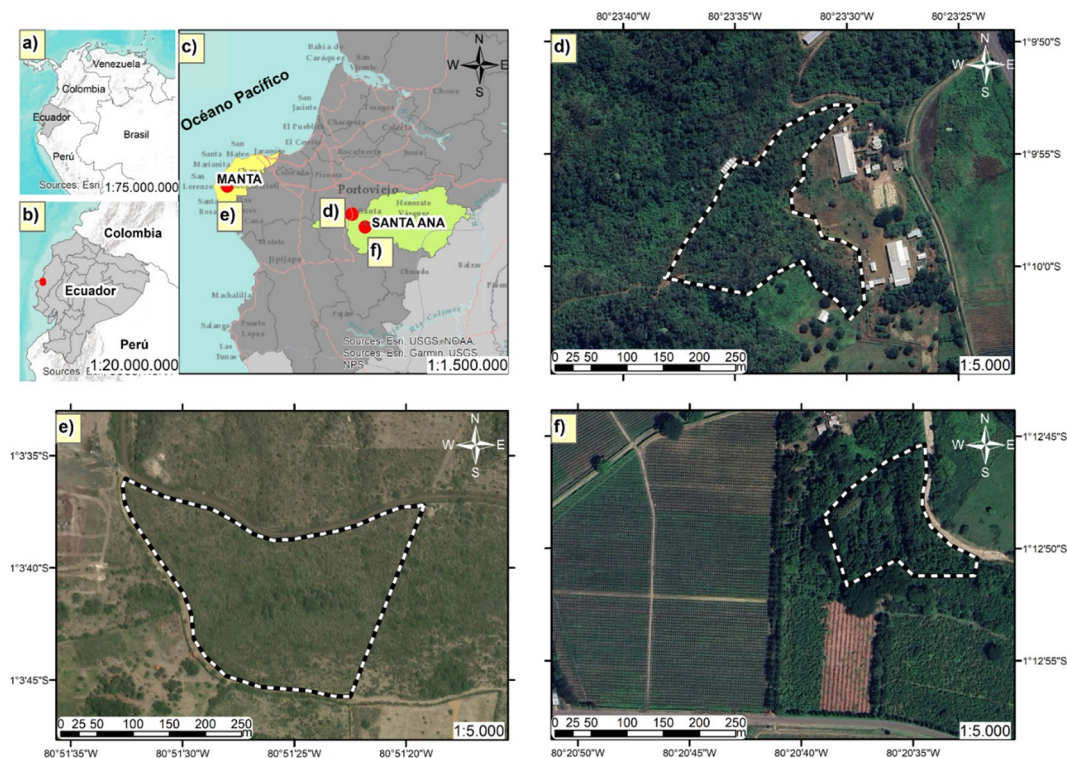


Figura 1. Ubicación relativa de los ecosistemas evaluados. a) y b): Suramérica y Ecuador; c) Cantón Manta y Cantón Santa Ana; d) Bosque seco tropical, campus Lodana; e) Bosque seco tropical, Reserva Natural de Pacoche y f) Ecosistema agroforestal, finca La Germania

Cada ecosistema fue dividido en dos parcelas de 10 x 5 m (50 m²) y en cada una se ubicaron 4 puntos de muestreo distanciados a 2 m uno de otro, donde se colocaron las cámaras de respiración de suelo SRC-2 a una profundidad de 0 a 20 cm (figura 2).

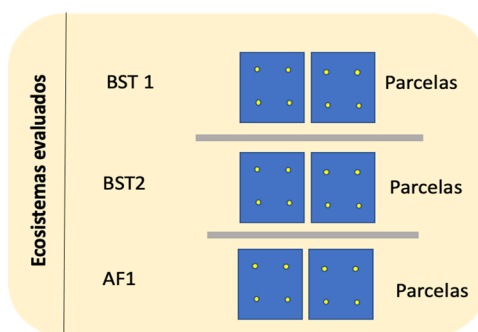


Figura 2. Esquema experimental para la medición de los parámetros del suelo. BST1 y BST2: Bosque seco tropical, AF1: Sistema agroforestal. Los cuadrados azules representan las parcelas (n=6). Los círculos amarillos indican a los puntos de muestreo de suelo (n=4).

Medición del dióxido de carbono edáfico

Para medir el contenido de CO₂ edáfico se utilizó un analizador de gas de CO₂ portátil EGM-5 (PP Systems, Amesbury, MA) con un sensor incorporado de temperatura y humedad del suelo (HydraProbe II - Stevens Water Monitoring Systems) configurado con un tiempo de 2 minutos y medidas internas cada 2 segundos, para un total de 60 datos por punto de muestreo. El análisis se realizó a las 12h00 aplicando el analizador de gas de manera directa al suelo en cada punto de muestreo y al menos 24 h después de la lluvia u otros eventos de perturbación. Las muestras de gas se recolectaron del espacio superior de cada cámara utilizando una cámara de respiración de suelo SRC-2 conectada al analizador EGM - 5.

Características edáficas

Una vez retirado el sistema de medición del gas, se tomaron las muestras de suelo a 0-20 cm de profundidad y 15 cm de diámetro utilizando un barreno de acero inoxidable. El pH y la conductividad eléctrica se analizaron con el equipo multiparámetro WTWTM, modelo pH/Cond 3320 Set 2 (ProfiLineTM), previa obtención de los extractos del suelo. El extracto se obtuvo mezclando 10g de suelo con 10 mL de agua destilada, se agitó por 2 minutos y se dejó reposar por 10 minutos.

La densidad aparente se midió por el procedimiento de la probeta adaptado del método ASTM D4531-15 (ASTM, 2015).

Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas consideradas fueron la temperatura del aire y presión atmosférica, obtenidas de la estación meteorológica “La Teodomira”, perteneciente al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador.

Análisis estadístico

Los datos fueron tratados mediante estadística descriptiva (promedio y desviación estándar). Se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con un error $\alpha = 0,05$ y prueba de medias LSD para evaluar diferencias estadísticas, colocando el tipo de ecosistema como variable independiente y las características edáficas y meteorológicas como variable dependiente. Los datos se procesaron con el programa STATGRAPHICS Centurion XVI versión 17.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Características de los suelos

Las características estudiadas de los suelos y los parámetros meteorológicos se encuentran en la tabla 1. Los valores de pH reflejan que los suelos de los ecosistemas BST2 y AF1 son cercanos a la neutralidad (pH=7,0), por tanto son suelos donde se pueden obtener altos rendimientos agrícolas, útiles para el cultivo de muchas especies (Luna *et al.*, 2021), mientras que el suelo del ecosistema BST1 es altamente alcalino, lo cual no lo hace óptimo para cultivos. La conductividad eléctrica fue baja (118,1 a 219,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indicativo de que los suelos evaluados no tienen problemas de salinización. La densidad aparente (2,3 a 3,3 g/cm^3) refleja buena granulometría de los suelos, mientras que los valores de temperatura del suelo (28,08 a 30,10 °C), humedad del suelo (10,9 a 17,28%), presión atmosférica (970,8 a 1007,31 mbar) y temperatura del aire (26,2 a 32,1 °C) están determinados por la época del año en la que se realizó el estudio (meses julio-agosto).



Tabla 1. Características edáficas y variables meteorológicas de los ecosistemas. Bosque Seco Tropical 1 (BST1), Bosque Seco Tropical 2 (BST2) y sistema Agroforestal (AF1).

Característica	Sistema Evaluado		
	BST1	BST2	AF1
pH	10,5 ± 0,3 ^a	6,8 ± 0,3 ^c	7,4 ± 0,4 ^b
C.E. (µs/cm)	219,7 ± 74,2 ^a	204,3 ± 32,8 ^a	118,1 ± 76,4 ^b
Densidad aparente (g/cm ³)	2,3 ± 0,20 ^a	3,2 ± 0,98 ^b	3,3 ± 0,38 ^b
Temperatura del suelo (°C)	28,1 ± 0,87 ^a	33,3 ± 0,20 ^b	30,1 ± 0,85 ^{ab}
Humedad del suelo (%)	17,3 ± 2,53 ^a	18,7 ± 2,80 ^a	10,9 ± 7,70 ^b
Presión atmosférica (mbar)	970,8 ± 0,14 ^a	1007,3 ± 0,08 ^b	1002,5 ± 0,14 ^{ab}
Temperatura del aire (°C)	26,2 ± 0,33 ^a	35,8 ± 0,2 ^b	32,1 ± 1,0 ^{ab}

Resultados expresados como el promedio y desviación estándar de 8 réplicas. Letras diferentes indican diferencia estadística significativa a un α de 0,05.

Respiración edáfica y flujos de dióxido de carbono

En la tabla 2 se muestran los resultados de la determinación de CO₂ edáfico en los tres sistemas ecológicos evaluados, distribuidos en dos parcelas cada uno. Se observan valores entre 0,309 y 0,806 g CO₂ m⁻² h⁻¹, con diferencia estadística a un error α = 0,05 entre el flujo de CO₂ emitido por cada tipo de ecosistema, mientras que los promedios de respiración edáfica de las dos parcelas que conforman cada ambiente en estudio presentaron resultados estadísticamente iguales. El ecosistema BST1 generó los valores más altos (0,711 y 0,806 g CO₂ m⁻² h⁻¹, promedio de 0,759 g CO₂ m⁻² h⁻¹), caso contrario al ecosistema AF1 donde se observan los valores más bajos de emisiones de CO₂ (0,309 a 0,361 g CO₂ m⁻² h⁻¹ y 0,335 g CO₂ m⁻² h⁻¹ de promedio); por su parte, el ecosistema BST2 generó emisiones de CO₂ entre 0,482 a 0,505 g CO₂ m⁻² h⁻¹, equivalentes a 0,494 g CO₂ m⁻² h⁻¹ de promedio.

Tabla 2. Respiración edáfica de los tres sistemas ecológicos estudiados, divididos en parcelas. Bosque Seco Tropical 1 (BST1), Bosque Seco Tropical 2 (BST2) y sistema Agroforestal (AF1).

Ecosistema	Parcela	Respiración edáfica (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	
		Promedio	Desviación estándar
BST1	Parcela 1	0,711 ^a	0,108
	Parcela 2	0,806 ^a	0,066
BST1 Global		0,759	0,087
BST2	Parcela 1	0,482 ^b	0,207
	Parcela 2	0,505 ^b	0,107
BST2 Global		0,494	0,157
AF1	Parcela 1	0,361 ^{bc}	0,011
	Parcela 2	0,309 ^c	0,089
AF1 global		0,335	0,050

Resultados expresados como el promedio y desviación estándar de 4 réplicas. Letras diferentes indican diferencia estadística significativa a un α de 0,05.

Los resultados de la respiración edáfica para los tres ecosistemas estudiados (BST1, BST2 y AF1) son acordes a los reportados en estudios previos para bosques secos tropicales, lo que corrobora las tendencias y niveles de CO₂ edáficos generados por los ecosistemas evaluados. Al respecto, Adachi *et al.* (2009) encontraron tasas de respiración en un bosque seco tropical de Tailandia, equivalentes a 0,402 g CO₂ m⁻² h⁻¹ para temporada seca y 1,041 g CO₂ m⁻² h⁻¹ en período húmedo. De manera similar, Raich (2017) presenta valores entre 0,60 y 0,83 g CO₂ m⁻² h⁻¹ en suelos de bosques tropicales de tierras bajas de Costa Rica, con plantaciones de árboles tropicales de hoja perenne de 15 a 20 años.

Las tasas de emisión de CO₂ edáfico para cada ecosistema evaluado fueron comparados tanto a nivel de ecosistema como a nivel de bloque para verificar la estabilidad y reproducibilidad de los datos (figuras 3 y 4). A partir del ANOVA se obtuvo un valor F= 30,72 con una p< 0,05, que indica diferencia significativa entre los promedios de emisión de CO₂ de los suelos estudiados de bosque seco tropical ubicados en los cantones de Manta y Santa Ana y en el ecosistema agroforestal del cantón Santa Ana. Este resultado puede atribuirse a diferentes factores, principalmente los asociados a las características edáficas; la humedad del suelo pudo ser determinante, ya que los dos ecosistemas con mayor emisión (BST1 y BST2) de CO₂ presentaron la humedad más alta (tabla 1). En este sentido, Pingintha-durden *et al.*, (2007) sostienen que la humedad del suelo afecta la producción de CO₂ porque repercute sobre la respiración de la raíz, los procesos microbianos y el desplazamiento de los gases; Zhou *et al.* (2007) encontraron que largas sequías disminuyen el flujo de CO₂ del suelo, independientemente de la temperatura del mismo. La temperatura del suelo también pudo afectar los resultados del estudio: el ecosistema BST1 (mayores emisiones de CO₂) obtuvo el valor más bajo de temperatura edáfica (28,08 °C); cuando el suelo posee una humedad ideal para la actividad biológica, la temperatura del suelo determina la tasa de respiración. (Carbone *et al.*, 2011)

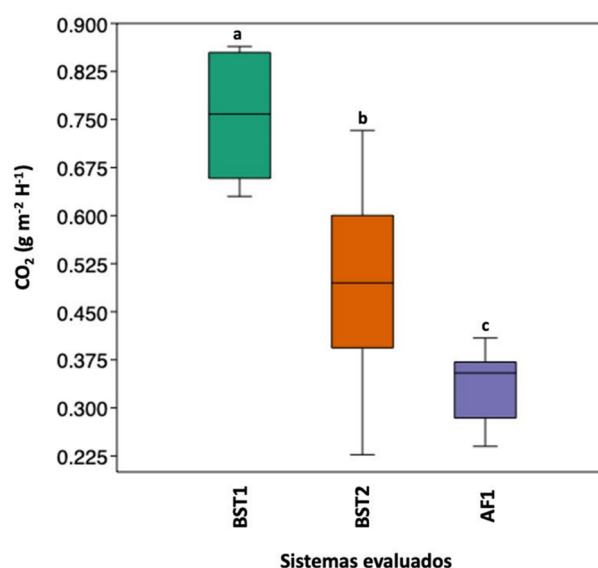


Figura 3. Respiración edáfica promedio de los tres sistemas estudiados. Bosque Seco Tropical 1 (BST1), Bosque Seco Tropical 2 (BST2) y sistema Agroforestal (AF1). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre sistemas ($P < 0,05$).

Adicionalmente, factores como el pH, densidad aparente, tipo de vegetación, materia orgánica disponible y los procesos microbianos pudieron causar diferencias en la respiración edáfica de los 3 ecosistemas. Millán Romero *et al.* (2019) reportan correlación entre el contenido de materia orgánica y la respiración edáfica, además indican que características como la porosidad, pH, densidad aparente y la capacidad de intercambio catiónico pueden afectar las emisiones de CO₂. Asimismo, Snyder *et al.* (2009) sostienen que el pH del suelo afecta su actividad microbiana y por tanto, las emisiones de CO₂.

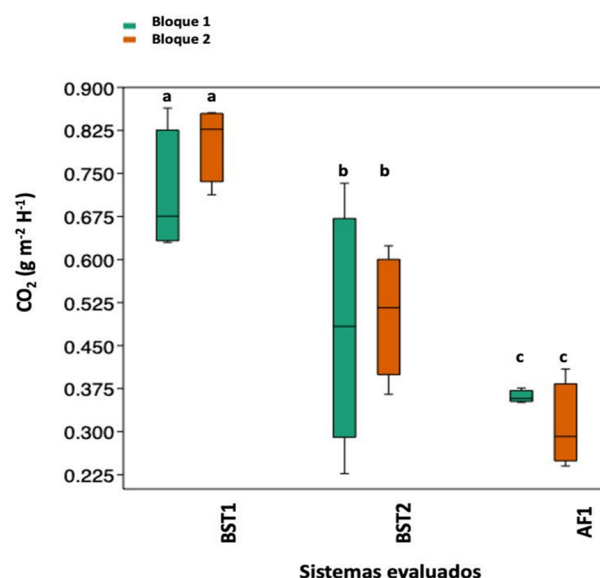


Figura 4. Respiración edáfica promedio de los tres sistemas ecológicos estudiados. Bosque Seco Tropical 1 (BST1), Bosque Seco Tropical 2 (BST2) y sistema Agroforestal (AF1). *Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre bloques ($P < 0,05$).*

La figura 4 muestra los valores de emisiones de CO_2 edáfico en tres sistemas de bosque: Bosque Seco Tropical 1 (BST1), Bosque Seco Tropical 2 (BST2) y un sistema Agroforestal (AF1), evaluados en dos bloques (Bloque 1 y Bloque 2). En el BST1, los valores de emisión de CO_2 se encuentran concentrados entre 0,75 y 0,85, con una ligera variación entre los dos bloques. Ambos bloques presentan la misma clasificación estadística, representada por la letra “a”, lo que indica que no hay diferencias significativas entre ellos. Esto sugiere una notable estabilidad en las emisiones dentro de este sistema forestal. Por otro lado, el BST2 muestra un rango más amplio de emisiones, especialmente en el Bloque 1, donde los valores oscilan aproximadamente entre 0,40 y 0,70, mientras que en el Bloque 2 el rango es más reducido, con emisiones que varían entre 0,45 y 0,65. Sin embargo, al igual que en el caso del BST1, ambos bloques comparten la misma clasificación estadística (letra “b”), lo cual también denota estabilidad en las emisiones promedio de CO_2 dentro de este sistema, a pesar de las diferencias en la amplitud de los rangos.

En cuanto al sistema Agroforestal (AF1), este presenta los valores más bajos de emisiones de CO_2 edáfico. En el Bloque 1, las emisiones se encuentran concentradas entre 0,25 y 0,35, mientras que en el Bloque 2 se observa un rango más amplio que llega hasta 0,45. A pesar de esta mayor variación en el Bloque 2, ambos mantienen la misma clasificación estadística, identificada con la letra “c”, lo que nuevamente indica la ausencia de diferencias significativas entre los bloques evaluados.

En los tres sistemas analizados, no se evidenciaron diferencias significativas entre los bloques evaluados. Esto destaca una consistencia en los valores de emisiones de CO_2 edáfico dentro de cada sistema, independientemente del bloque al que pertenecen. Además, se observa un gradiente claro en las emisiones, siendo más altas en el BST1, intermedias en el BST2 y más bajas en el sistema Agroforestal (AF1). Este patrón podría estar relacionado con diferencias estructurales y funcionales entre los sistemas, como la densidad de raíces, la cobertura del suelo y la actividad microbiana, factores que influyen directamente en las emisiones de CO_2 desde el suelo.

Factores que afectan la respiración edáfica

Para evaluar las relaciones entre factores edáficos y climáticos con las tasas de emisión de dióxido de carbono del suelo, en los ecosistemas evaluados, se procedió a realizar una matriz de correlaciones (Pearson) en la que se contrastaron la mayor parte de variables.

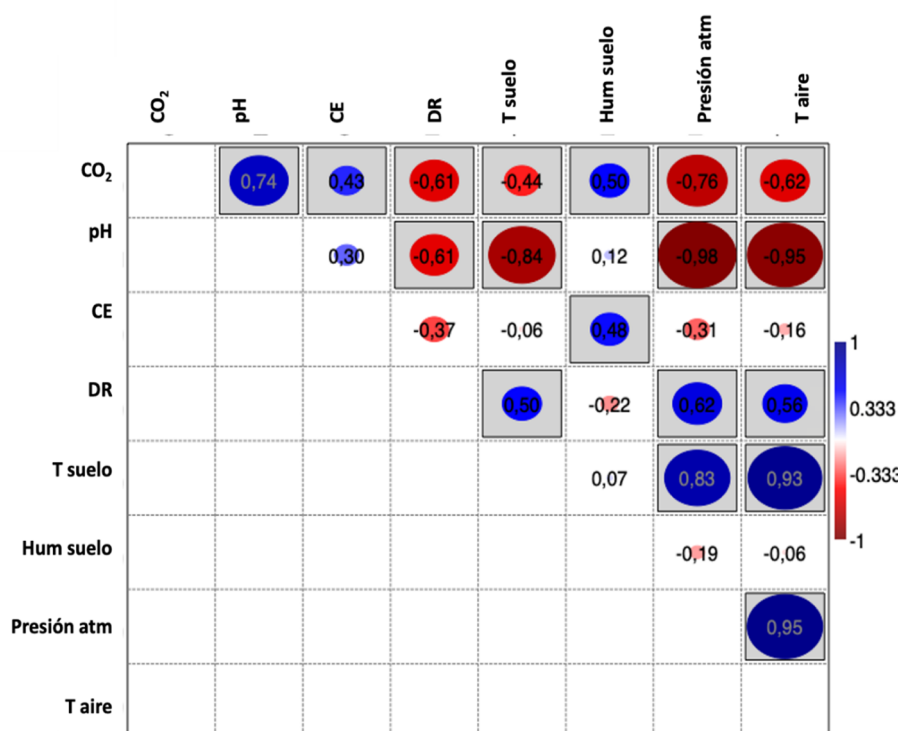


Figura 5. Correlación de Pearson de la respiración edáfica (CO₂) de los tres ecosistemas estudiados versus propiedades del suelo y variables meteorológicas. CE: Conductividad eléctrica; DR: Densidad real; T suelo: Temperatura del suelo; Hum suelo: Humedad relativa del suelo; Presión atm: Presión atmosférica; T aire: Temperatura del aire. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre bloques ($P < 0,05$).

La matriz de correlaciones (figura 5) muestra las relaciones entre las emisiones de CO₂ edáfico y diversos parámetros edáficos y meteorológicos, tales como pH, conductividad eléctrica (CE), densidad relativa (DR), temperatura del suelo, humedad del suelo, presión atmosférica y temperatura del aire. Se destacan correlaciones positivas y negativas de diferentes magnitudes, que sugieren posibles factores que afectan las emisiones de CO₂ desde el suelo.

El CO₂ edáfico muestra una correlación positiva fuerte con la humedad del suelo ($r = 0,50$) y la conductividad eléctrica ($r = 0,43$). Esto indica que suelos con mayor contenido de agua y mayor concentración de sales tienden a liberar más CO₂. En el caso de la humedad del suelo, esto podría deberse a que una mayor disponibilidad de agua favorece la actividad microbiana y los procesos de descomposición de la materia orgánica, lo que incrementa las emisiones de CO₂. La relación con la conductividad eléctrica podría explicarse por el hecho de que suelos con mayor contenido de nutrientes disponibles (reflejados por una CE más alta) también favorecen la actividad microbiana y la respiración del suelo. En contraste, las correlaciones negativas más marcadas se observan entre el CO₂ y la presión atmosférica ($r = -0,76$), así como con la temperatura del aire ($r = -0,62$) y el pH ($r = -0,61$). La relación negativa con la presión atmosférica puede estar asociada a que, bajo presiones más bajas, las condiciones podrían favorecer la acumulación y liberación de gases desde el suelo hacia la atmósfera, incrementando las emisiones de CO₂.



En el caso de la temperatura del aire, temperaturas más altas suelen estar asociadas a un menor contenido de humedad en el suelo, lo que podría limitar los procesos microbianos responsables de la liberación de CO_2 , mientras que la relación negativa con el pH podría deberse a que suelos más ácidos tienden a inhibir ciertas actividades microbianas y la mineralización de la materia orgánica. Además, se observan correlaciones indirectas a través de parámetros relacionados entre sí. Por ejemplo, la temperatura del aire tiene una correlación positiva muy fuerte con la temperatura del suelo ($r = 0,93$), lo que sugiere que estas variables trabajan en conjunto para influir en las emisiones de CO_2 . De manera similar, la humedad del suelo tiene una relación negativa con la presión atmosférica ($r = -0,19$), indicando un posible balance entre la humedad disponible y las condiciones atmosféricas que pueden influir en la dinámica de los gases.

De acuerdo a las correlaciones obtenidas en el presente estudio, se podría inferir que las emisiones de CO_2 edáfico parecen estar fuertemente influenciadas por la humedad del suelo, la presión atmosférica y la temperatura, que afectan directamente la actividad biológica y los procesos de descomposición en el suelo. Las correlaciones positivas reflejan cómo la disponibilidad de agua y nutrientes potencia estos procesos, mientras que las correlaciones negativas podrían estar asociadas a limitaciones físicas o químicas que reducen la emisión de CO_2 . Este análisis sugiere la importancia de integrar factores meteorológicos y edáficos para comprender la dinámica de emisiones de CO_2 en distintos sistemas ecológicos.

CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que el diseño experimental empleado fue consistente, evidenciando una marcada estabilidad y reproducibilidad de los datos entre bloques, puntos de muestreo y ecosistemas evaluados. Esta consistencia metodológica respalda la fiabilidad de las mediciones realizadas y refuerza la validez de las conclusiones sobre las emisiones de CO_2 edáfico en los tres sistemas analizados. En cuanto a las tasas de emisión de CO_2 , el Bosque Seco Tropical 1 (BST1), ubicado en la Reserva Natural de Pacoche, presentó las tasas más altas, seguido del Bosque Seco Tropical 2 (BST2) del campus Lodana y finalmente el sistema Agroforestal (AF1) de la finca La Germania. Estas diferencias pueden atribuirse principalmente a las condiciones edáficas específicas de cada ecosistema, especialmente a la disponibilidad de humedad en el suelo, que influye directamente en la actividad microbiana y en los procesos de respiración del suelo.

La mayor tasa de emisión de CO_2 registrada en el BST1 sugiere que este ecosistema tiene un potencial significativo como fuente de carbono hacia la atmósfera, lo que tiene implicaciones importantes en términos de cambio climático. En contraste, el sistema agroforestal (AF1), al mostrar tasas más bajas, podría desempeñar un papel como estrategia de manejo sostenible para mitigar las emisiones de carbono. Esto resalta la importancia de los sistemas agroforestales en iniciativas de conservación y manejo de suelos, así como en la reducción de impactos climáticos asociados a las emisiones edáficas. Por tanto, el manejo adecuado de la humedad del suelo y las prácticas que promuevan la estabilidad de la materia orgánica podrían ser claves para reducir las emisiones de CO_2 en los bosques secos tropicales.

En cuanto a los factores que influyen en la respiración del suelo, la humedad edáfica se destacó como el factor positivo más importante, ya que su incremento favorece la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica, lo que se traduce en mayores emisiones de CO_2 . Por otro lado, factores como la presión atmosférica y el pH mostraron correlaciones negativas significativas con las emisiones, lo que podría deberse a que presiones más altas limitan la liberación de gases y que suelos más ácidos tienden a inhibir procesos microbianos críticos para la mineralización de carbono.

En síntesis, los ecosistemas evaluados muestran diferencias importantes en sus tasas de respiración edáfica, siendo los valores más altos registrados en el bosque seco tropical de la Reserva Natural de Pacoche, lo cual resalta su relevancia en términos de emisiones de carbono. La humedad del suelo se identifica como un factor determinante en las emisiones, mientras que variables como la presión atmosférica y el pH podrían limitar estos flujos.

Estas conclusiones enfatizan la necesidad de continuar investigando los flujos de carbono edáfico en diversos ecosistemas, especialmente aquellos que, como los bosques secos tropicales, son particularmente vulnerables al cambio climático y la degradación ambiental. Además, los sistemas agroforestales emergen como una alternativa viable para mitigar las emisiones de carbono, contribuyendo al manejo sostenible y la conservación de los recursos naturales.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a FONTAGRO por el financiamiento otorgado a esta investigación en el marco de la cooperación técnica No. ATN/RF-18959-RG: Proyecto “Nanofertilizantes en el suelo y emisiones de óxido nitroso”, ejecutado en colaboración entre la Universidad Técnica de Manabí (UTM), Ecuador y la Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca Yáñez, J. C., & Zumba Maliza, A. L. (2021). *Respiración edáfica de los suelos de páramo de Pungalá-Sub Cuenca Río Chambo*. [Trabajo de integración curricular]. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14803/1/156T0037.pdf>
- Adachi, M., Ishida, A., Bunyavejchewin, S., Okuda, T., & Koizumi, H. (2009). Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. *Journal of Tropical Ecology*, 25(5), 531–539. https://translate.google.com/translate?hl=es-419&sl=en&u=https://www.researchgate.net/publication/228506351_Spatial_and_temporal_variation_in_soil_respiration_in_a_seasonally_dry_tropical_forest_Thailand&prev=search&pto=aue
- Almendariz, A., Hamilton, P., Mouette, C., & Robles, C. (2012). Análisis de la herpetofauna de los bosques secos y de transición de la reserva biológica Tito Santos, Manabí-Ecuador. *Revista Politécnica*, 30(3), 62–82. https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5054/4/Herpetofauna_bosques_secos_Tito_Santos_2012Politecnica30%283%29.pdf
- Andrade, M., & Hernández, C. (2010). *Caracterización y propuesta técnica de la acuicultura en el Sector de Manta, Provincia de Manabí*. [Trabajo de grado]. Ecuador: Escuela Superior Técnica del Litoral. https://www.academia.edu/124387050/Caracterizaci%C3%B3n_y_propuesta_tecnica_de_la_acuicultura_en_el_canton_manta
- ASTM. (2015). Standard Test Methods for Bulk and Dry Density of Peat and Peat Products. *ASTM Int.*
- Belmonte, D. (2019). Flujo de CO₂ en suelos dominados por manglares *Avicennia germinans* y *Conocarpus erectus*. *Revista Geográfica Venezolana*, 60(2), 284–299. <https://www.redalyc.org/journal/3477/347766130003/347766130003.pdf>
- Carbone, M. S., Still, C. J., Ambrose, A. R., Dawson, T. E., Williams, A. P., Boot, C. M., Schaeffer, S. M., & Schimel, J. P. (2011). Seasonal and episodic moisture controls on plant and microbial contributions to soil respiration. *Oecologia*, 167(1), 265–278. https://www.researchgate.net/publication/51046464_Seasonal_and_episodic_moisture_controls_on_plant_and_microbial_contribution
- Fernández Losada, M. Y. (2017). Revisión de métodos para la estimación de captura de carbono almacenadas en bosques naturales. [Trabajo de especialización]. Colombia: Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/16394?mode=full>
- García Morote, F. A., Abellán, M. A., Rubio, E., Martínez García, E., García Saucedo, F., Picazo Córdoba, M. I., & López Serrano, F. R. (2022). Productivity and seasonality drive total soil respiration in semi-arid Juniper woodlands (*Juniperus thurifera* L., southern Spain). *Forests*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/f13040538>





- Luna, D., Felipe, C., Triana, T., Palencia, L., Moreno, H., & Pulido, A. (2021). Emisiones de CO₂ por aplicación de cal en suelos ácidos de Colombia. *Gobierno de Colombia*, 2, 2–19. <https://biocarbono.org/wp-content/uploads/2021/09/02-emisiones-co2-por-aplicacion-cal-suelos-acidos-colombia.pdf>
- Millán Romero, E., Salcedo Nartínez, L., & Millán Páramo, C. (2019). Efectos de cuatro tipos de vegetación sobre la respiración del suelo en la Universidad de Sucre. *EIEI ACOFI*, 1–11. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/169/163>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). *Los bosques y suelos forestales contribuyen de manera esencial a la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial*. <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>
- Ostaiza Demera, K. J., Jarre Castro, E. J., Pacheco Gil, H. A., & Zamora-Ledezma, E. (2020). Propuesta híbrida para la captación y medición de CO₂ edáfico empleando cámaras de incubación estáticas y secuestro de gases. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 2, 33–40. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/33615/35417>
- Pingintha-durden, N., Chayawat, C., Hong, J., & LeClerc, M. (2007). Luo and X. Zhou, Soil Respiration and the Environment, Academic Press, An Imprint of Elsevier Science, London (2006) ISBN 0-12-088782-7. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144, 243–244.
- Powers, J.S. (2019). ¿Serán vulnerables los bosques tropicales secos a los cambios climáticos, y cuáles serán sus efectos sociales?. Cuadernos de Investigación UNED, 11(1), pp. S18–S23. <https://www.redalyc.org/journal/5156/515661223002/html/>
- Raich, J. W. (2017). Temporal variability of soil respiration in experimental tree plantations in lowland costa rica. *Forests*, 8(40). <https://www.mdpi.com/1999-4907/8/2/40>
- Ramírez-Huila, W. N., Geada-López, G., & Sotolongo-Sospedra, R. (2023). Estructura y diversidad en un fragmento de bosque seco deciduo asociado a comunidades humanas en Manabí, Ecuador. *Avances*, 25(3), 292–309. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9013539>
- Ramírez Huila, W., & Ayoví Garces, N. E. (2023). Estructura y composición arbórea del bosque seco tropical en el valle Sancán, Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 11(1), 2–21. <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/682#.YLLQCgmXiKw.mendeley>
- Reinoso, N. G., Blanco González, G. & Quintero Ichazo, Y. (2021). Factores determinantes en la comercialización de productos turísticos en el cantón Manta, Manabí, Ecuador. *El Periplo Sustentable*, (41), 83–109. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8075242.pdf>
- Riofrio, I. (2018). El bosque seco, una joya amenazada en el Ecuador. <https://es.mongabay.com/2018/07/ecuador-bosque-seco/>
- Rosales Malpartida, J. Y. (2022). Predicción de la contaminación atmosférica generada por las emisiones del CO₂ en el Perú utilizando los métodos ARIMA y Redes Neuronales. *Tecnohumanismo*, 2(1), 114–125. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8266605>
- Rosillo, T., Vivanco, H., Villavicencio, M., & Macías, H. (2020). Comercialización apícola, tendencia del mercado en la Provincia del Guayas (Ecuador). *Revista Espacios*, 41(21), 135–145. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n21/a20v41n21p11.pdf>

- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133(3–4), 247–266. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880909001297>
- Sosa-Rodrigues, B. A., & García-Vivas, Y. S. (2019). Emisión de gases de efecto invernadero en el suelo bajo el uso de abonos verdes. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 767–782. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v30n3/2215-3608-am-30-03-00767.pdf>
- Valverde Amor, Á. L., Ortiz, S., & Barranco, S. A. (2022). *Efecto del clareo y sus residuos sobre la emisión de gases de efecto invernadero en suelos de pinar y robledal del Parque Nacional de Sierra Nevada*. [Trabajo de fin de master]. Colombia: Universidad de Granada. https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/83997/TFM_LUCIA_VALVERDE_AMOR.pdf?sequence=1&isAllowed=y

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Autor	Contribución
Erika Jacqueline Demera Demera	Desarrollo de la investigación, redacción del manuscrito
Emilio José Jarre Castro	Asesoría de la investigación
Ezequiel Zamora-Ledezma	Revisión del manuscrito

