

Dinámica del flujo de dióxido de carbono del suelo en el humedal de la Bahía Interior de Puno

Soil carbon dioxide flux dynamics in the Puno Inland Bay wetland

 Mario Flores-Aroni^{1,3*},  Cesar Ccama Ramos²,  José Henrique Cattanio^{3,4}

Resumen

Los ecosistemas de humedal desempeñan un papel crucial en el ciclo global del carbono debido a su elevado contenido de materia orgánica (MO), lo que los convierte en importantes emisores o sumideros de dióxido de carbono (CO₂) del suelo. No obstante, en el Perú, los estudios enfocados en la dinámica de CO₂ del suelo son limitados. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar los flujos de dióxido de carbono del suelo en el humedal de la Bahía Interior de Puno. Se seleccionaron tres zonas de muestreo: S1 (frente a Salcedo), S2 (cerca de la Isla Espinar) y S3 (frente a la UNA–Puno). El monitoreo de flujo de CO₂ se realizó durante las épocas seca (octubre 2022) y lluviosa (enero 2023), empleando un analizador portátil de CO₂ medido por infrarrojos (EGM-4–PP Systems), conectado a una cámara de respiración (SRC-1–PP Systems), el diseño experimental aplicado fue completamente aleatorizado con análisis factorial. Los resultados indicaron que la emisión de CO₂ del suelo varió significativamente entre épocas ($p < 0.05$) y entre zonas de muestreo. El flujo más alto se registró en S3 durante la época lluviosa, con un valor de 0.99 g CO₂ m⁻² h⁻¹, mientras que el más bajo se observó en la misma zona durante la época seca, con 0.67 g CO₂ m⁻² h⁻¹. Asimismo, se determinó que la emisión de CO₂ del suelo está influenciada por factores ambientales que varían con la estación del año. Se identificaron correlaciones positivas y estadísticamente significativas con la temperatura del aire ($r = 0.51$), temperatura del suelo ($r = 0.49$), humedad del suelo ($r = 0.39$), conductividad eléctrica ($r = 0.54$) y pH del suelo ($r = 0.36$). Estos hallazgos evidencian la importancia de los humedales altoandinos en las emisiones de CO₂ del suelo, por lo que deben ser considerados en las estimaciones del balance global de carbono.

Palabras clave: Altoandino, Bahía Interior de Puno, dióxido de carbono, humedal, materia orgánica.

Abstract

Wetland ecosystems play a crucial role in the global carbon cycle due to their high organic matter (OM) content, which makes them important emitters or sinks of soil carbon dioxide (CO₂). However, in Peru, studies focused on soil CO₂ dynamics are limited. In this context, the present study aimed to evaluate soil carbon dioxide fluxes in the Inner Bay wetland of Puno. Three sampling zones were selected: S1 (in front of Salcedo), S2 (near Espinar Island) and S3 (in front of UNA–Puno). CO₂ flux monitoring was carried out during the dry (October 2022) and rainy (January 2023) seasons, using a portable infrared CO₂ analyzer (EGM-4–PP Systems), connected to a breathing chamber (SRC-1–PP Systems), the experimental design applied was completely randomized with factorial analysis. The results indicated that soil CO₂ emission varied significantly between seasons ($p < 0.05$) and between sampling zones. The highest flux was recorded in S3 during the rainy season, with a value of 0.99 g CO₂ m⁻² h⁻¹, while the lowest was observed in the same zone during the dry season, with 0.67 g CO₂ m⁻² h⁻¹. Likewise, it was determined that soil CO₂ emission is influenced by environmental factors that vary with the season of the year. Positive and statistically significant correlations were identified with air temperature ($r = 0.51$), soil temperature ($r = 0.49$), soil moisture ($r = 0.39$), electrical conductivity ($r = 0.54$) and soil pH ($r = 0.36$). These findings show the importance of high Andean wetlands in soil CO₂ emissions, so they should be considered in global carbon balance estimates.

Keywords: High Andean, Puno Inland Bay, carbon dioxide, wetland, organic matter, carbon dioxide, organic matter.

Recibido: 18/11/2024

Aceptado: 14/07/2025

Publicado: 16/07/2025

Sección: Artículo Original

*Autor correspondiente: marioflores@unap.edu.pe

Introducción

El altiplano sudamericano es una de las mesetas semiáridas de gran altitud más extensas del mundo. En del Altiplano, las turberas conocidas como “bofedales” o humedales son componentes importantes de la hidrología regional y brindan recursos hídricos clave y servicios ecosistémicos a las comunidades andinas (MINAM, 2019). El calentamiento de las temperaturas, los cambios en el hidroclima y en los patrones de circulación atmosférica están afectando la dinámica y la hidrología de las turberas (Anderson et al., 2021), y pueden estar afectando la dinámica del carbono.

Los suelos se consideran sumideros o fuentes potenciales de gases de efecto invernadero (GEI)

atmosféricos directamente asociados con el cambio climático global (Sá et al., 2019). Actualmente, el cambio climático puede cambiar los regímenes de temperatura y precipitación, alterando el equilibrio de estos procesos, lo que hace que los humedales se conviertan en fuentes

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

² Facultad de Ingenierías, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Privada San Carlos, Puno, Perú

³ Programa de Posgrado en Ciencias Ambientales. Universidad Federal de Pará, Belém, Brasil

⁴ Laboratorio de Ciclos Biogeoquímicos. Universidad Federal de Pará, Belém, Brasil.

Como citar: Flores-Aroni, M., Ccama Ramos, C., & Henrique Cattanio, J. (2025). Dinámica del flujo de dióxido de carbono del suelo en el humedal de la Bahía Interior de Puno. *Revista De Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 27, e27679. <https://doi.org/10.18271/ria.2025.679>



de carbono (Ramsar, 2018). En un clima más cálido, los puntos críticos para la pérdida/ganancia de carbono del suelo pueden cambiar rápidamente (Naidu & Bagchi, 2021). La salida de CO_2 del suelo tiene una fuerte relación con la humedad del suelo, lo que puede explicar las variaciones estacionales en el flujo de CO_2 en el ecosistema (Souza et al., 2017). En la actualidad, muchos suelos que antiguamente eran sumideros de GEI, ahora, con los efectos del cambio climático están cambiando su comportamiento de almacenar carbono a convertirse en fuente de CO_2 (Naidu & Bagchi, 2021).

La evidencia arqueológica establece patrones espaciales y temporales de uso y abandono de campos agrícolas en la región del lago Titicaca y el altiplano boliviano-peruano. Los cambios climáticos anteriores a 1500 a.C., que produjeron aridez en las tierras altas, impidieron la agricultura intensiva, y en los períodos más húmedos (1500 a.C. a 1100 d.C.) sustentaron grandes asentamientos humanos mediante el desarrollo de la agricultura (Binford et al., 1997). Los bofedales altoandinos tienen altas reservas de carbono y son sensibles al cambio climático, lo que lo convierte en un excelente registro para la investigación ambiental (Huaman et al., 2020). Los humedales altoandinos son ecosistemas frágiles con alta productividad, como sumideros de carbono (Silva et al., 2017; Checalla, 2023), brindan servicios ecosistémicos para mantener la biodiversidad y la economía andina, pero ahora se encuentran en riesgo debido a la amenaza global del cambio climático (Paucatanco et al., 2020).

Es de gran relevancia determinar los flujos de GEI, en particular del CO_2 , en humedales, debido a

la intrincada dinámica biogeoquímica que distingue a estos ecosistemas. Este análisis estimó la conducta del carbono en los terrenos de humedales altoandinos durante las temporadas de lluvia y sequía, con el propósito de entender su fluctuación estacional y su aporte a las emisiones de carbono.

En la región de Puno, aún no se han llevado a cabo estudios sobre el flujo de CO_2 . Por lo tanto, este estudio aporta al entendimiento de los factores que influyen en la liberación del CO_2 a la atmósfera, incorporando el papel de los humedales altoandinos en las estimaciones del flujo de carbón regional y global.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El Lago Titicaca, está ubicado en los andes centrales, a 3810 m.s.n.m., lago de agua dulce más alto del mundo (Ramsar, 2003). La Bahía Interior de Puno, que forma parte del lago Titicaca del lado peruano (Figura 1), se encuentra frente a la ciudad de Puno y tiene una superficie aproximadamente 16 km², el suelo se formó por la sedimentación de las aguas de la bahía (Moreno et al., 2017) y el área de estudio tiene una precipitación anual de 700-1000 mm y una temperatura promedio de 12 a 13 °C (Maldonado-Jimenez et al., 2021).

Los suelos de la Bahía Interior de Puno exhiben elevados niveles de nitrato, resultado de una notable contaminación antropogénica que se puede apreciar en el lugar (Andrade et al., 2020).

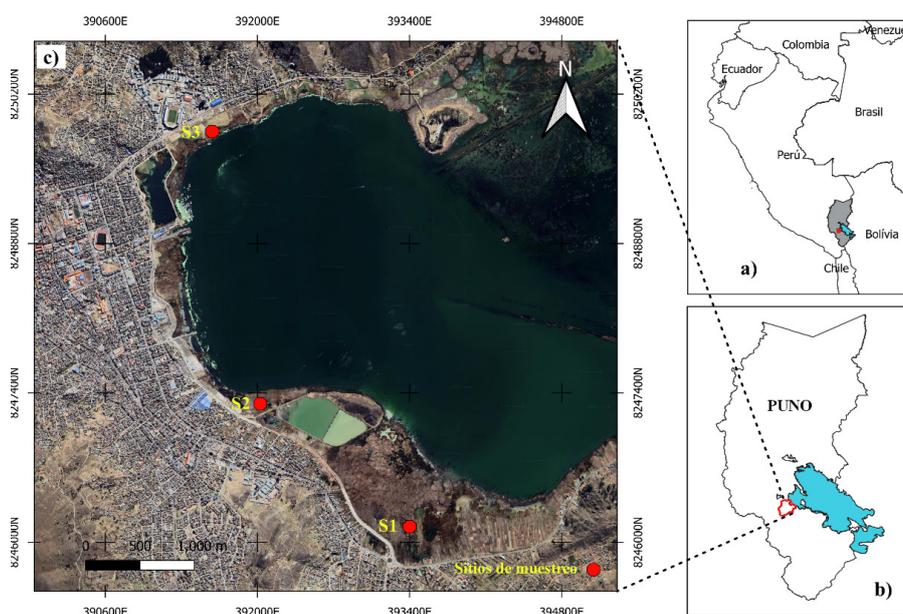


Figura 1. Ubicación del área de estudio: a) mapa de Perú; b) ubicación del departamento de Puno; c) sector de la Bahía Interior de Puno.

Ubicación de zonas de muestreo

Se seleccionaron tres zonas de muestreo y medición dentro del territorio de la Bahía Interior de Puno, ubicada en el lago Titicaca (Tabla 1; Figura 1).

La elección se llevó a cabo de forma aleatoria conforme a la guía para muestreo de suelos del (MINAM, 2014), garantizando la representatividad de las zonas. Las zonas seleccionadas fueron: Frente a Salcedo (S1), Cercanías de la Isla Espinar (S2) y Frente a la UNA-Puno (Tabla 1).

Tabla 1. Zonas de medición y muestreo en la Bahía interior del Lago Titicaca, sector Puno

Zonas de medición y muestreo	Coordenadas UTM		Ubicación
	X	Y	
S1	393275.8	8246299.5	Frente a Salcedo
S2	391813.5	8247308.3	Cercanías de la Isla Espinar
S3	391849.0	8249947.1	Frente a la UNA-Puno

Medición de flujo de CO₂ del suelo

En cada zona seleccionada (S1, S2 y S3) se instalaron 6 anillos de PVC para medición de flujo de CO₂ utilizando diseño completamente aleatorizado con análisis factorial. Los flujos de CO₂ se midieron durante cuatro días consecutivos, en el mes de octubre (2022, época seca) y en el mes enero (2023, época lluviosa), entre las 8:00 am y las 1:00 pm, mediante un sistema dinámico cerrado entre un Analizador portátil de CO₂ medido por infrarrojos (EGM -4-PP Systems), conectado a una cámara de respiración (SRC-1-PP Systems) (Aryal et al., 2017).

Ta: Temperatura del aire (°C), en Kelvin (K)

Vd: Volumen dentro de la cámara de respiración EGM (Volumen de la cámara SRC-1)

A: Área de suelo sobre la cual se midió el flujo de CO₂ (cubierta por la cámara (m²))

R: Constante universal de los gases (8.314 J K⁻¹ mol⁻¹)

Vc: volumen de la cámara de respiración por encima de la superficie del suelo en el momento de la medición (volumen total de la cámara interna (m³))

Cálculo de los flujos de dióxido de carbono

Los flujos de CO₂ (g m⁻² h⁻¹) se integraron en función del tiempo y se calcularon mediante la siguiente ecuación (Marthews et al., 2014):

$$F_s = \left(\frac{C_n - C_1}{t_n - t_1} \right) \left(\frac{P}{T_a} \right) \left(\frac{V_d}{A} \right) \left(\frac{44.01 * 0.36}{R} \right) gCO_2 m^{-2} h^{-1}$$

$$F_{sc} = F_s \left(\frac{V_d - V_c}{V_d} \right) gCO_2 m^{-2} h^{-1}$$

Fs: Flujo de CO₂ sin corregir el volumen añadido de la cámara de respiración

Fsc: Flujo de CO₂ corregido por volumen en g CO₂ m⁻² h⁻¹

Cn-C1: Diferencia en el flujo de CO₂, calculada generalmente a partir de las últimas 10 lecturas de cada medición, o entre el primer y el último valor cuando la medición contiene menos de 10 lecturas, expresada en ppmv

tn-t1: Intervalo de tiempo, en segundos, utilizado para calcular la diferencia en el flujo de CO₂.

P: Presión atmosférica ambiental en milibares (mb), promediada sobre tn-t1 según lo medido por el EGM

44.01: Peso molecular de CO₂ (g/mol)

Es posible obtener un debate más exhaustivo sobre el método de medición y cálculo del eflujo de CO₂ (Marthews et al., 2014).

Determinación de variables bióticas y abióticas

Las mediciones de las variables bióticas (biomasa de raíces y carbono orgánico del suelo) y abióticas (humedad y temperatura del suelo) se realizaron en cada punto de muestreo durante las épocas seca y lluviosa. Las muestras de humedad y carbono orgánico del suelo fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional del Altiplano (UNA-Puno).

Durante la medición de los flujos de CO₂, se registró la temperatura del suelo utilizando un termómetro digital (TP 300). Simultáneamente, se midieron la humedad relativa, temperatura del aire, presión atmosférica, velocidad del viento e intensidad de la iluminación con un anemómetro multifuncional (GM8910). Además, se determinó el nivel freático mediante piezómetros instalados en cada zona de estudio.

Cabe señalar que, durante la época lluviosa, algunas zonas del humedal presentaban condiciones de saturación del suelo, pero no se encontraban completamente inundadas. Por ello, fue posible realizar las mediciones de campo de manera continua, adaptando cuidadosamente la instalación de los equipos para evitar interferencias por el exceso de agua superficial.

Diseño estadístico

Se evaluó la normalidad de la información de flujos de CO_2 , junto con las variables bióticas y abióticas, a través del test de Shapiro-Wilks. Para establecer diferencias relevantes entre las áreas de muestreo y las épocas (lluviosa y seca) en el humedal de la Bahía Interior de Puno, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), complementado con la prueba de Tukey para múltiples comparaciones ($p < 0.05$), siempre que se respetara la

condición de normalidad. Se examinó la correlación entre el flujo de CO_2 y los elementos bióticos y abióticos, así como la época y la zona, a través de correlaciones lineales de Pearson. Se llevaron a cabo todos los análisis estadísticos usando el programa InfoStat versión 12.

Resultados

Flujo de CO_2 del suelo en diferentes zonas de la Bahía Interior de Puno

Evaluando la salida de CO_2 en relación a las diferentes zonas de estudio, notamos que no se encontró una diferencia significativa ($p > 0.05$) entre las mediciones en la época seca (Figura 2). En la época lluviosa los flujos de CO_2 fueron significativamente mayores ($p < 0.05$) en S3 en comparación con S1 y S2, los cuales no difirieron estadísticamente ($p > 0.05$).

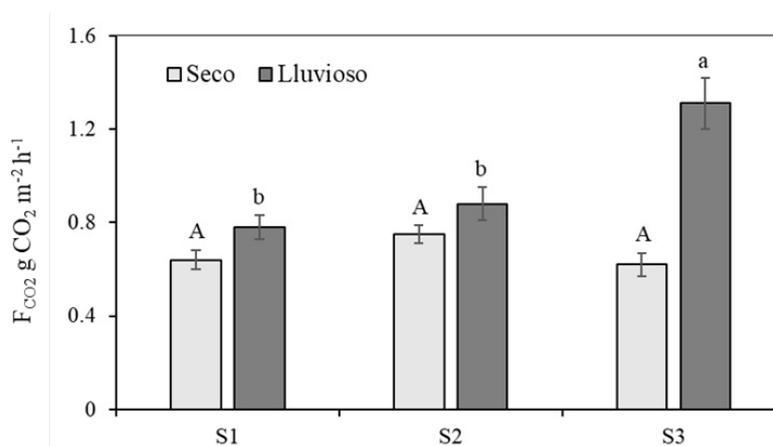


Figura 2. Flujo de CO_2 del suelo en la Bahía Interior del Lago Titicaca, medido en tres zonas: S1 (Frente a Salcedo), S2 (Cercanías de la Isla Espinar) y S3 (Frente a la UNA-Puno). Las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre zonas durante la época seca, mientras que las letras minúsculas corresponden a comparaciones durante la época lluviosa. Diferentes letras representan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Flujo de CO_2 del suelo en época seca y lluviosa en la Bahía Interior de Puno

El flujo de CO_2 del suelo (Figura 3) en el humedal de la Bahía Interior del Lago Titicaca fue mayor ($p < 0.05$) en época lluviosa ($0.99 \pm 0.05 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) en comparación a la época seca ($0.67 \pm 0.03 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Condiciones atmosféricas y del suelo

Durante la época seca, la temperatura del suelo (T_s) osciló entre 14.56 y 16.67 °C, mientras que en la época lluviosa varió entre 16.73 y 19.99 °C. El valor promedio más alto se registró en la época lluviosa (18.12 ± 0.23 °C) y el más bajo en la época

seca (15.32 ± 0.58 °C), observándose una diferencia estadísticamente significativa entre ambas épocas ($p < 0.05$). La temperatura del aire (T_a) fluctuó entre 19.10 y 22.25 °C durante la época seca, y entre 24.44 y 26.55 °C en la época lluviosa, siendo significativamente mayor en esta última ($p < 0.05$). En cuanto a la humedad relativa (HR), se registró un valor promedio de 36.73 % en la época lluviosa y 26.56 % en la época seca, con una diferencia estadísticamente significativa entre ambas estaciones ($p < 0.05$). La velocidad del viento (V_v) y presión atmosférica (P) sin diferencias significativas entre épocas y la iluminación mostró diferencia significativa entre épocas, con mayor intensidad de iluminación en época lluviosa (Tabla 2).

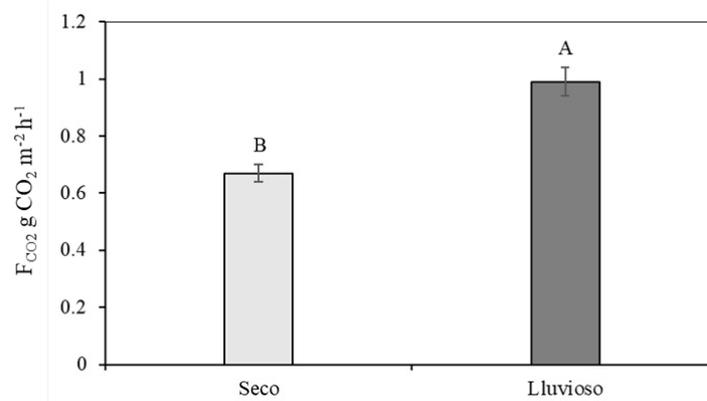


Figura 3. Flujo de CO₂ del suelo (g CO₂ m⁻² h⁻¹) en el humedal de la Bahía Interior del Lago Titicaca durante las épocas seca y lluviosa. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey (p<0.05).

Tabla 2. Valores de temperatura del suelo (Ts), temperatura del aire (Tar), humedad relativa (HR), velocidad del viento (Vv), presión atmosférica (P) e iluminación durante las épocas seca y lluviosa. Letras diferentes indican diferencias significativas entre épocas, según la prueba de Tukey (p<0.05).

Zonas	Ts (°C)	Tar (°C)	HR	Vv (m/s)	P (hPa)	Iluminación (Lux)
	Media ± E.E	Media ± E.E	Media ± E.E	Media ± E.E	Media ± E.E	Media ± E.E
S1	16.67 ± 1.29	22.25 ± 1.24	23.44 ± 2.4	2.73 ± 0.45	646.25 ± 1.49	40309.63 ± 7668.66
S2	14.76 ± 0.87	21.56 ± 1.42	26.28 ± 2.8	2.06 ± 0.29	646.63 ± 1.59	40492.50 ± 7535.7
S3	14.54 ± 0.75	19.10 ± 1.31	29.98 ± 2.67	1.21 ± 0.37	646.20 ± 1.32	37288.50 ± 7330.36
Seco	15.32 ± 0.58^b	20.97 ± 0.78^b	26.56 ± 1.55^b	2.00 ± 0.24^a	646.36 ± 0.81^a	39363.54 ± 4155.98^b
S1	16.73 ± 0.31	24.44 ± 1.54	38.84 ± 2.46	1.93 ± 0.09	646.09 ± 0.35	49892.88 ± 3890.14
S2	17.64 ± 0.17	26.55 ± 1.36	35.49 ± 1.63	1.98 ± 0.08	646.71 ± 0.52	49834.88 ± 2460.99
S3	19.99 ± 0.37	25.40 ± 1.08	35.86 ± 1.41	1.61 ± 0.10	644.53 ± 0.43	54612.00 ± 0.00
Lluvioso	18.12 ± 0.23^a	25.46 ± 0.76^a	36.73 ± 1.09^a	1.84 ± 0.06^a	645.78 ± 0.31^a	51446.58 ± 1538.68^a

E.E = error estándar de la media.

Propiedades del suelo

La napa freática en el suelo fue mayor (p < 0.05) en la época seca (-26.89 ± 0.45 cm), en comparación con la época lluviosa (-11.26 ± 0.65 cm). Así, la humedad del suelo (HS) también mostró variación significativa (p<0.05) entre épocas, con 25.27% de humedad en la época seca y 37.73% en la época lluviosa. El pH del

suelo no varió entre la época seca y lluviosa (p > 0.05). El contenido de carbono orgánico del suelo (COS) y materia orgánica del suelo (MOS) no fue diferente (p > 0.05) entre época seca y lluviosa (Tabla 3). Sin embargo, la materia seca de raíces (MS_RAIZ) fue 27.4% mayor (p<0.05) en la época seca. La conductividad eléctrica (CE) fue mayor (p < 0.05) en la época de lluvias (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de napa freática, pH, humedad del suelo (HS), carbono orgánico del suelo (COS), materia orgánica del suelo (MOS), conductividad eléctrica (C.E.) y materia seca de la raíz (MS_RAIZ) durante las épocas seca y lluviosa. Letras diferentes indican diferencias significativas entre periodos estacionales, según la prueba de Tukey (p<0.05).

Zonas	Napa freática	pH	HS	COS	MOS	C.E.	MS_RAIZ
	(cm)		(%)	(%)	(%)	mS/cm	(%)
S1	-26.83	7.60	22.40	2.30	3.98	0.70	39.10
S2	-28.40	7.58	29.80	0.81	1.39	0.69	51.87
S3	-25.45	7.82	23.60	0.81	1.49	0.69	40.90
Seco	-26.89 ± 0.45^a	7.67 ± 0.08^a	25.27 ± 2.29^b	1.31 ± 0.49^a	2.29 ± 0.85^a	0.69 ± 0.01^b	43.96 ± 3.99^a
S1	-10.25	7.67	34.66	2.37	4.08	0.78	15.69
S2	-13.33	7.63	41.85	1.08	1.86	0.78	20.57
S3	-10.20	7.91	36.68	1.00	1.74	0.85	13.42
Lluvioso	-11.26 ± 0.65^b	7.74 ± 0.09^a	37.73 ± 2.14^a	1.48 ± 0.44^a	2.56 ± 0.76^a	0.80 ± 0.02^a	16.56 ± 2.11^b

Relación del flujo de CO₂ del suelo y factores ambientales

Se encontró una correlación positiva y significativa ($p < 0.05$) entre el flujo de CO₂ y la temperatura de aire (Tar) e iluminación, Tanto en época seca como en lluviosa, en las diferentes zonas de estudio. Estos

resultados destacan la influencia de la temperatura del aire y la radiación lumínica en la dinámica del flujo de CO₂ en los suelos evaluados. No obstante, no se encontró correlación entre los flujos de CO₂ y la humedad relativa del aire (HR), la velocidad del viento (Vv) y la presión atmosférica (P) (Tabla 4).

Tabla 4. Correlación de Pearson entre las variables analizadas durante las épocas seca y lluviosa (Índice de significancia: $p < 0.05$). Las variables consideradas fueron: flujo de CO₂ del suelo; Tar: temperatura del aire; HR: humedad relativa; Vv: velocidad del viento; P: presión atmosférica e iluminación

Variables	Tar	HR	Vv	P	Iluminación
Flujo de CO ₂	0.51**	0.07 ^{NS}	0.00 ^{NS}	-0.07 ^{NS}	0.37**
Tar		-0.12	0.13	0.19	0.64
HR			0.05	-0.49	0.02
Vv				-0.19	0.07
P					0.14

NS = no significativo; nivel de significancia: * $p < 0.05$ y ** $p < 0.01$

El análisis de Pearson (Tabla 5) indica que existe una correlación positiva significativa ($p < 0.05$) entre el flujo de CO₂ y la temperatura del suelo (Ts), humedad del suelo (HS), conductividad eléctrica (C.E.) y el pH del suelo. Asimismo, el flujo de CO₂ tuvo una correlación

negativa ($p < 0.05$) con el nivel freático y la materia seca de raíces (MS_RAIZ). No se encontró correlación ($p > 0.05$) entre el flujo de CO₂ con carbono orgánico y la materia orgánica del suelo (Tabla 5).

Tabla 5. Correlación de Pearson entre las variables analizadas durante las épocas seca y lluviosa (nivel de significancia: $p < 0.05$). Las variables evaluadas incluyeron: flujo de CO₂ del suelo; Ts: temperatura del suelo; napa freática; HS: humedad del suelo; COS: carbono orgánico del suelo; MOS: materia orgánica del suelo; C.E.: conductividad eléctrica; pH: potencial de hidrógeno y MS_RAIZ: materia seca de la raíz.

Variables	Ts	Napa freática	HS	COS	MOS	C.E.	pH	MS_RAIZ
Flujo de CO ₂	0.49**	-0.37**	0.39**	-0.17 ^{NS}	-0.17 ^{NS}	0.54**	0.36**	-0.40**
Ts		-0.33	0.29	0.05	0.05	0.42	0.21	-0.38
Napa freática			-0.80	-0.17	-0.16	-0.92	-0.40	0.97
HS				-0.18	-0.19	0.78	0.09	-0.72
COS					1	0.02	-0.37	-0.26
MOS						0.01	-0.36	-0.26
C.E.							0.53	-0.92
pH								-0.44

NS = no significativo; nivel de significancia: * $p < 0.05$ y ** $p < 0.01$

Discusión

En un bofedal ubicado en el distrito de Capaso, en el departamento de Puno, se observó un comportamiento similar al del presente estudio, tanto entre zonas como entre épocas del año, con diferencia significativa ($p < 0.05$). El flujo de CO₂ fue mayor durante la época lluviosa (1.25 g CO₂ m⁻² h⁻¹) en comparación con la época seca (0.63 g CO₂ m⁻² h⁻¹), valores que coinciden con los registrados en suelos de la Bahía Interior del Lago Titicaca (Checalla, 2023). De igual manera, en otro

bofedal ubicada en la provincia de El Collao se reportaron 0.39 y 1.05 g CO₂ m⁻² h⁻¹ para las épocas seca y lluviosa, respectivamente, lo que confirma una mayor emisión de CO₂ del suelo durante la época lluviosa (Mamani, 2024). Asimismo, Sá et al. (2019) reportaron en la Patagonia flujos de CO₂ que oscilaron entre 0.35 y 0.81 g CO₂ m⁻² h⁻¹ en suelos cubiertos de tundra y bosques, alcanzando valores máximos de 2.62 y 2.39 g CO₂ m⁻² h⁻¹ en suelos de tundra, con promedios de 0.65 y 0.54 g CO₂ m⁻² h⁻¹ en diciembre y febrero, respectivamente; estos resultados

también son comparables con los obtenidos en el presente estudio en bofedales.

En un bosque tropical de México, el flujo de CO_2 del suelo presentó una media de $0.63 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ durante tres temporadas del año (Arellano-Martín et al., 2022), valor muy similar al registrado en época seca del presente estudio. Por otro lado, Ayala et al. (2018) reportaron una marcada variación estacional y temporal en la reparación del suelo, atribuida principalmente al aumento de las precipitaciones.

De manera similar, Becerra (2021), en una investigación realizada en Colombia en tres tipos de cobertura (sitio hidromórfico, bosque húmedo inundable y sabana inundable), encontró diferencias significativas en los flujos de CO_2 entre los sitios evaluados. En particular, el flujo promedio de $1.2 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en la cuenca hidromórfica. Además, se identificó que la temperatura del suelo y el pH explicaron aproximadamente el 36,7 % de las variaciones en el flujo de CO_2 , destacando la influencia de estos factores en la dinámica de emisión de CO_2 .

Cruz-Sánchez et al. (2022) reportaron flujos de CO_2 del suelo en bosques templados de México entre 0.33 y $0.82 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en invierno y primavera, respectivamente, valores que concuerdan con los obtenidos en el presente estudio. El carbono almacenado puede liberarse a la atmósfera debido a la disminución de la humedad de la turba y acelerar los procesos de calentamiento global (Harenda et al., 2018). Es importante mantener la humedad del suelo para evitar alteraciones en el flujo de CO_2 , con la consiguiente disminución del carbono en el suelo y un aumento del CO_2 atmosférico.

La temperatura del suelo del bofedal Huachipampa ubicado en la Reserva Paisajística Nor Yauyos Cochas durante los periodos de evaluación registró valores dentro del rango de 4.3 a $9.0 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que los valores para Tambo Real entre 8.6 a $11.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (Baldoceña, 2020), esos valores de temperatura son menores que los del presente estudio que fue $16.72 \text{ }^\circ\text{C}$ en promedio. En el bofedal de la Moya en Melgar, la T_s fue de 18.14 y $14.16 \text{ }^\circ\text{C}$ en época seca y lluviosa, respectivamente (Flores, 2023). En el bofedal sector Vizcachani, distrito de Capaso Mamani (2024), reporta valores similares al presente estudio en Tar ($16.18 \text{ }^\circ\text{C}$), HR (30.64%), Vv, (2.18 m/s), Presión atmosférica (597.66 hPa) e iluminación (30355.65 lux).

El contenido de materia orgánica del suelo del humedal de la Bahía interior del Lago Titicaca es semejante al de suelos agrícolas de México con valores de 1.74 , 2.99 y 3.10% , asimismo, la conductividad eléctrica es menor (0.40 mS/cm) en época seca a comparación de la

época lluviosa (1.35 mS/cm), indicando que el contenido de sales es mayor en época lluviosa (Albíter-Pineda et al., 2020). En humedales de Huachipampa y Tambo Real en Lima, los valores de MO variaron entre 1.07% a 49.12% , el pH se encontró dentro del rango de 5 a 6.9 , que corresponde a la clasificación de moderadamente ácido a ligeramente ácido, la humedad del suelo encontrado fue de 18.52% y 43.35% (Baldoceña et al., 2021). En el presente estudio, el mayor contenido de materia orgánica se observó en condiciones de alta humedad del suelo (37.73%). En los suelos de bofedales en la Región Puno, la MO de 5.25% (Mamani & Mamani, 2019), representando 2.23 veces mayor cantidad de MO a la encontrada en este estudio.

En un bofedal ubicado en el distrito de Capaso, en el departamento de Puno, se reportó la existencia de una relación entre el flujo de CO_2 con la temperatura del aire ($r = 0.40$) e iluminación ($r = 0.53$) (Checalla, 2023; Nuñez, 2024), ese mismo comportamiento fue observado en la presente investigación con la temperatura del aire ($r = 0.51$) e iluminación ($r = 0.37$).

En un bofedal ubicado en el distrito de Capaso, la temperatura y humedad del suelo tuvieron correlación positiva con los flujos de CO_2 (Checalla, 2023; Mamani, 2024), ese resultado es similar a la presente investigación (temperatura del suelo ($r = 0.49$) y humedad del suelo (0.39)). Igualmente, en suelos áridos en México los principales factores para mayores tasas de respiración del suelo fueron la humedad y temperatura, incrementan la actividad microbiana del suelo (Ayala et al., 2018; Albíter-Pineda et al., 2020; Cruz-Sánchez et al., 2022). En área verde urbana los que más promovieron las emisiones son la precipitación, humedad relativa del aire y contenido de humedad del suelo (Silva, 2022). El aumento de la temperatura contribuye a la respiración del suelo entre un 55 y 89% (Tiruvaimozhi & Sankaran, 2019).

Conclusiones

El flujo de CO_2 no mostró diferencias notables entre las tres áreas estudiadas; no obstante, durante el periodo lluvioso se notó una diferencia considerable entre la zona S3 (Frente a la UNA-Puno) y la zona S1 (Frente a Salcedo), mientras que la zona S2 (Cercanías de la Isla Espinosa) no mostró una disminución notable respecto a las dos otras. En cambio, factores como la temperatura del terreno y del aire, la humedad relativa, la humedad del suelo, el carbono orgánico del suelo y la conductividad eléctrica exhibieron niveles más elevados durante el periodo de lluvias.

El flujo de CO_2 del suelo del humedal de la Bahía Interior del Lago Titicaca varía entre épocas del año, existiendo mayor emisión de CO_2 a la atmósfera durante

la época lluviosa, esto se debe a la acción de la lluvia que aumenta la humedad del suelo y, en consecuencia, la actividad microbiana.

La temperatura del aire, iluminación, temperatura y humedad del suelo, así como la conductividad eléctrica y pH, influyen en la emisión de CO₂ del suelo. Los resultados indican que la interacción entre la temperatura y la humedad del suelo, junto con los efectos de la conductividad eléctrica y el pH, constituyen los principales factores que determinan las variaciones en la tasa de emisión de CO₂ del suelo.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Biogeoquímica del Programa de Posgrado en Ciencias Ambientales de la Universidad Federal de Pará–Brasil por prestar el equipo para la medición de flujos de dióxido de carbono. A los revisores, cuyos comentarios mejoraron la calidad del artículo.

Referencias

- Albíter-Pineda, J. F., Vaca, R., Aguila, P. del, Yáñez-Ocampo, G., & Lugo, J. (2020). Flujo de CO₂ y su relación con propiedades bioquímicas en cultivos hortícolas en invernadero. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 7(3). <https://doi.org/10.19136/era.a7n3.2548>
- Anderson, T. G., Christie, D. A., Chávez, R. O., Olea, M., & Anchukaitis, K. J. (2021). Spatiotemporal Peatland Productivity and Climate Relationships Across the Western South American Altiplano. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(6), e2020JG005994. <https://doi.org/10.1029/2020JG005994>
- Andrade, K., Castillo, I., & Rossel, L. (2020). Quality of Agricultural Soils in the Interior Bay of Puno, Peru-2018. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(2), 42-52. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542020000200042&script=sci_arttext
- Arellano-Martín, F., Dupuy, J. M., Us-Santamaría, R., & Andrade, J. L. (2022). El flujo de CO₂ del suelo fluctúa en tres temporadas del año en un bosque tropical semidecíduo de Yucatán, México. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.968>
- Aryal, D. R., Jong, J., Mendoza-Vega, J., Ochoa-Gaona, S., & Esparza-Olguín, L. (2017). Soil Organic Carbon Stocks and Soil Respiration in Tropical Secondary Forests in Southern Mexico. En *Global Soil Security* (Springer International Publishing, pp. 153-165). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43394-3_14
- Ayala, F., Maya, Y., & Troyo, E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 93-104. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.334>
- Baldoceda, Á., Maldonado, M., & Alcántara, F. (2021). Análisis del porcentaje de humedad, materia orgánica y porosidad del suelo de dos tipos de bofedales. *Ciencia & Desarrollo*, 20(2), Article 2. <https://doi.org/10.33326/26176033.2021.2.1204>
- Baldoceda, I. A. (2020). *Análisis de la humedad de suelo de los bofedales Huachipampa y Tambo Real, en la Reserva Paisajística Nor Yauyos Cochabamba* [Tesis Pregrado, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. <https://repositorio.ucss.edu.pe/handle/20.500.14095/814>
- Becerra, A. F. (2021). *Emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) suelo-atmósfera en tres coberturas de un paisaje de turberas de la Amazonía Nororiental Colombiana* [Tesis Pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/58982>
- Binford, M. W., Kolata, A. L., Brenner, M., Janusek, J. W., Seddon, M. T., Abbott, M., & Curtis, J. H. (1997). Climate Variation and the Rise and Fall of an Andean Civilization. *Quaternary Research*, 47(2), 235-248. <https://doi.org/10.1006/qres.1997.1882>
- Checalla, J. (2023). *Flujo de dióxido de carbono del suelo en el bofedal del sector Pampa Uta, en el Distrito de Capaso—El Collao, 2022* [Tesis de Pre grado, Universidad Privada San Carlos]. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/508>
- Cruz-Sánchez, Y., López-Teloxa, L. C., Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., Cruz-Sánchez, Y., López-Teloxa, L. C., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2022). Respiración de CO₂ desde el suelo en bosques templados del Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl, centro de México. *Bosque (Valdivia)*, 43(2), 125-133. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002022000200125>
- Flores, M. (2023). *Dinámica del flujo de dióxido de carbono del suelo en el bofedal de la Moya, en el distrito de Ayaviri—Melgar, 2022* [Tesis Pregrado, Universidad Privada San Carlos]. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/660>

- Harenda, K. M., Lamentowicz, M., Samson, M., & Chojnicki, B. H. (2018). The Role of Peatlands and Their Carbon Storage Function in the Context of Climate Change. En T. Zielinski, I. Sagan, & W. Surosz (Eds.), *Interdisciplinary Approaches for Sustainable Development Goals* (pp. 169-187). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71788-3_12
- Huaman, Y., Moreira-Turcq, P., Espinoza, R., Llanos, R., Apaéstegui, J., Turcq, B., & Willems, B. (2020). Influencia de los cambios climáticos en la acumulación de carbono en Bofedales Altoandinos durante los últimos 2 500 años. *Ecología Aplicada*, 19(1), 35-41. <https://doi.org/10.21704/rea.v19i1.1444>
- Maldonado-Jimenez, I., Aparicio-Saavedra, M. E., Maldonado-Jimenez, I., & Aparicio-Saavedra, M. E. (2021). Estimación del almacenamiento de carbono en la biomasa de macrófitas en la Bahía interior de Puno, lago Titicaca. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 8(2). <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2848>
- Mamani, D. M., & Mamani, H. O. (2019). *Determinación del secuestro de dióxido de carbono (CO₂) en el suelo mediante sumideros de carbono: Puyas de Raimondi (Puya raimondii Harms), Pajonal con Chillihuares y Bofedal, en el distrito de Putina – Puno, 2018* [Tesis Pregrado, Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2181>
- Mamani, M. (2024). *Reserva de carbono y emisión de dióxido de carbono del bofedal en el sector Vizcachani, distrito de Capaso, El Collao—2022* [Tesis Pregrado, Universidad Privada San Carlos]. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/945>
- Marthews, T. R., Riutta, T., Oliveras Menor, Urrutia, R., Moore, S., Metcalfe, D., Malhi, Y., Phillips, O., Huaraca Huasco, W., Ruiz Jaén, M., Girardin, C., Butt, N., & Cain, R. (2014). *Measuring Tropical Forest Carbon Allocation and Cycling: A RAINFOR-GEM Field Manual for Intensive Census Plots (v3.0)*. Global Ecosystems Monitoring network. https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:f33a0929-4675-43c6-91a3-8cbcd962775/download_file?file_format=application%2Fpdf&safe_filename=rainfor-gemmanual.v3.0.pdf&type_of_work=Report
- MINAM. (2014). *Guía para el muestreo de suelos*. Mavet Impresiones E.I.R.L. <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>
- MINAM. (2019). *Guía de evaluación del estado del ecosistema de bofedal*. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-evaluacion-estado-ecosistema-bofedal>
- Moreno, E., Argota, G., Alfaro, R., Aparicio, M., Atencio, S., & Goyzueta Camacho, G. (2017). Interactive determination by total metals in waters of inner Puno bay the Lake Titicaca-Peru. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(2), 125-134. <https://doi.org/10.18271/ria.2017.271>
- Naidu, D. G. T., & Bagchi, S. (2021). Greening of the earth does not compensate for rising soil heterotrophic respiration under climate change. *Global Change Biology*, 27(10), 2029-2038. <https://doi.org/10.1111/gcb.15531>
- Núñez, C. (2024). *Variabilidad espacial y temporal del flujo de dióxido de carbono del bofedal del sector Ccalluchani, Pichacani, Puno—2024* [Tesis Pregrado, Universidad Privada San Carlos]. <http://repositorio.upsc.edu.pe:8080/handle/UPSC/1021>
- Pauca-Tanco, A., Ramos-Mamani, C., Luque-Fernández, C. R., Talavera-Delgado, C., Villasante-Benavides, J. F., Quispe-Turpo, J. P., & Villegas-Paredes, L. (2020). Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016. *Revista de Teledetección*, 55(55), 105-118. <https://riunet.upv.es/handle/10251/147174>
- Ramsar. (2003). *Annotated List of Wetlands of International Importance* (p. 5) [Ramsar Sites Information Service]. https://rsis.ramsar.org/sites/default/files/rsiswp_search/exports/Ramsar-Sites-annotated-summary-Peru.pdf
- Ramsar. (2018). *Perspectiva Mundial Sobre Los Humedales: Estado de los Humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas* (Nigel Dudley). Secretaría de la Convención de Ramsar. <https://clmeplus.org/doculibrary/perspectiva-mundial-sobre-los-humedales-estado-de-los-humedales-del-mundo-y-de-los-servicios-que-prestan-a-las-personas-2018/>
- Sá, M. M. F., Schaefer, C. E. G. R., Loureiro, D. C., Simas, F. N. B., Alves, B. J. R., de Sá Mendonça, E., de Figueiredo, E. B., La Scala, N., & Panosso, A. R. (2019). Fluxes of CO₂, CH₄, and N₂O in tundra-covered and Nothofagus forest soils

- in the Argentinian Patagonia. *Science of The Total Environment*, 659, 401-409. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.328>
- Silva, A. V. (2022). *Fluxos de CO2 através da interface atmosfera / solo revado de uma área verde urbana do Norte Interior de Portugal* [masterThesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná]. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/26055>
- Silva, L. B. da, Novais, J. W. Z., Sanches, L., Machado, N. G., Aquino, A. M., & Sallo, F. da S. (2017). Serrapilheira e Efluxo de CO2 do Solo em Floresta Sazonalmente Alagável no Pantanal Brasileiro. *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde*, 21(3), Article 3. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2017v21n3p178-182>
- Souza, G. N. B. de, Araujo, A. C. de, Vasconcelos, S. S., Leal, L. do S. M., Pinto, C. a. D., & Costa, A. C. L. da. (2017). Influência da umidade do solo sobre a variação do efluxo de CO2 do solo na floresta nacional de Caxiuanã-PA. *X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*, 1-6. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1084932>
- Tiruvaimozhi, Y. V., & Sankaran, M. (2019). Soil respiration in a tropical montane grassland ecosystem is largely heterotroph-driven and increases under simulated warming. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276-277, 107619. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107619>