

EVALUACIÓN DE LA RESERVA DE CARBONO EN EL SUELO DEL HUMEDAL EL
CHARCO-OASIS EN VILLAVICENCIO, META



JUAN DIEGO PARRA PÉREZ
LESLY DANIELA GAMARRA SEGURA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2026

EVALUACIÓN DE LA RESERVA DE CARBONO EN EL SUELO DEL HUMEDAL EL
CHARCO-OASIS EN VILLAVICENCIO, META

JUAN DIEGO PARRA PÉREZ
LESLY DANIELA GAMARRA SEGURA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director
Ph.D. RAQUEL BEATRIZ ROMERO PUENTES
Ingeniera Ambiental, Magíster en Ingeniería Ambiental, Ph.D. en Ingeniería.

Codirector
Mg. MARTHA JULIETH HERRERA PEÑA
Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Especialista en Gerencia Integral de los sistemas de calidad,
los riesgos laborales y el medio ambiente, Magíster en Gestión Ambiental y Energética en las
Organizaciones

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2026

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O. P.

Vicerrector Académico General

P. Luis Antonio ALFONSO VARGAS, O. P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Juan Francisco CORREA HIGUERA, O. P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Ph.D. RAQUEL BEATRIZ ROMERO PUENTES

Decana de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Agradecimientos

Agradecemos a la directora y codirectora del presente trabajo por la orientación brindada, el acompañamiento constante y el apoyo en las diferentes etapas del proceso investigativo.

Al Grupo de Ecosistemas y Áreas Protegidas de la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (Cormacarena), por su apoyo durante todo el proceso de desarrollo de la investigación, así como por la gestión de permisos, el acompañamiento técnico y la disposición permanente para resolver inquietudes.

A nuestras familias, por el respaldo constante, la comprensión y el apoyo moral brindado a lo largo de la formación profesional, los cuales fueron fundamentales para la culminación de este proyecto.

Finalmente, a la Universidad Santo Tomás, Seccional Villavicencio, por la formación académica recibida y por proporcionar los espacios y recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado.

Contenido

	Pág.
Resumen	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
1. Objetivos	14
1.1. Objetivo general.....	14
1.2. Objetivos específicos	14
2. Antecedentes	15
3. Marco teórico	18
4. Metodología.....	21
4.1. Fase 1. Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del suelo del humedal	21
4.1.1 Reconocimiento de campo y definición de puntos de muestreo	21
4.1.2 Diseño de muestreo y recolección de muestras de suelo	25
4.1.3 Determinación de propiedades fisicoquímicas del suelo	26
4.2. Fase 2. Estimación del contenido de carbono orgánico total en el suelo.....	28
4.2.1 Determinación del carbono orgánico total mediante el método Walkley–Black	28
4.2.2 Cálculo de la reserva de carbono orgánico en el suelo	29
4.2.3 Estimación de la reserva total de carbono en el humedal	30
4.3. Fase 3. Evaluación de la distribución espacial del carbono orgánico en el suelo.....	31
4.3.1 Análisis estadístico multivariado de las propiedades del suelo	31
4.3.2 Análisis espacial de la distribución del carbono orgánico del suelo.....	33
5. Análisis y discusión de resultados.....	36
5.1. Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del suelo del Humedal.....	36
5.1.1 Propiedades físicas del suelo	36
5.1.2 Propiedades químicas del suelo	39
5.2. Contenido de carbono orgánico del suelo.....	44
5.2.1 Carbono orgánico total en los puntos de muestreo	44
5.2.2 Relación carbono-nitrógeno y dinámica de descomposición.....	46

5.2.3	Reserva de carbono orgánico por unidad de área	49
5.3.	Factores que influyen en la distribución del carbono orgánico	52
5.3.1	Análisis de correlación entre variables edáficas	52
5.3.2	Análisis de componentes principales	55
5.3.3	Distribución espacial del carbono orgánico	64
5.4.	Reserva total de carbono orgánico del humedal El Charco-Oasis	66
5.4.1	Estimación del stock de carbono orgánico en el suelo	66
5.4.2	Aporte ecosistémico del humedal como sumidero de carbono	67
6.	Impacto social y humanístico	70
	Conclusiones	72
	Referencias bibliográficas	75
	Anexos	82

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1 Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis.....	23
Tabla 2 Propiedades físicas del suelo en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis.	36
Tabla 3 Propiedades químicas del suelo en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis.	39
Tabla 4 Reserva de carbono orgánico por punto de muestreo del humedal El Charco-Oasis.	49
Tabla 5 Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las variables evaluadas.	52
Tabla 6 Puntuaciones (scores) de los puntos de muestreo en los seis primeros componentes principales del ACP.	56

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1 Delimitación del área de estudio en el humedal El Charco-Oasis.	22
Figura 2 Localización de los puntos de muestreo establecidos en el humedal El Charco-Oasis.	23
Figura 3 Registro fotográfico de los puntos de muestreo en el humedal El Charco-Oasis.	24
Figura 4 Esquema del diseño de muestreo de suelo mediante transecto lineal.	25
Figura 5 Diagrama metodológico	35
Figura 6 Propiedades físicas del suelo del humedal El Charco-Oasis.	37
Figura 7 Propiedades químicas relacionadas con el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo del humedal El Charco-Oasis.	41
Figura 8 Capacidad de retención de nutrientes y estabilización de materia orgánica en el suelo del humedal El Charco-Oasis.	42
Figura 9 Distribución del carbono orgánico total en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis.	44
Figura 10 Relación carbono-nitrógeno y correlación entre materia orgánica y carbono orgánico en el suelo del humedal El Charco-Oasis.	47
Figura 11 Reserva de carbono orgánico del suelo del humedal El Charco-Oasis.	49
Figura 12 Matriz de correlación de Spearman entre variables edáficas del humedal El Charco-Oasis.	53
Figura 13 Cargas factoriales de las variables en el componente principal 1 (PC1) del ACP.	57
Figura 14 Cargas factoriales de las variables en el componente principal 2 (PC2) del ACP.	59
Figura 15 Biplot del Análisis de Componentes Principales (PC1 vs PC2) para propiedades fisicoquímicas del suelo del humedal El Charco-Oasis.	61
Figura 16 Distribución espacial de la reserva de carbono orgánico en el suelo del humedal El Charco-Oasis (t C/ha)	65

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo 1 Resultados e interpretación del análisis fisicoquímico del suelo del humedal El Charco-Oasis (Laboratorio de Suelos, Universidad de los Llanos).....	82
Anexo 2 Resultados de humedad gravimétrica del suelo medidos en laboratorio USTA en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis	84
Anexo 3 Resultados de densidad aparente del suelo medidos en laboratorio USTA en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis	84
Anexo 4 Varianza explicada por los componentes principales del ACP aplicado a propiedades fisicoquímicas del suelo del humedal El Charco-Oasis.....	84
Anexo 5 Gráfico de sedimentación (scree plot) del Análisis de Componentes Principales para propiedades fisicoquímicas del suelo del humedal El Charco-Oasis.....	84
Anexo 6 Cargas factoriales (loadings) del análisis de componentes principales (ACP).....	85

Resumen

El presente estudio evaluó la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo del humedal El Charco-Oasis, ecosistema urbano ubicado en Villavicencio, Meta, con el propósito de cuantificar su aporte como sumidero de carbono. Se establecieron siete puntos de muestreo mediante un diseño no probabilístico dirigido, considerando la heterogeneidad ambiental del ecosistema. En cada punto se implementó un transecto lineal de 10 m y se recolectaron submuestras hasta 60 cm de profundidad para conformar muestras compuestas. Se determinaron propiedades físicoquímicas del suelo, incluyendo textura, densidad aparente, pH, nutrientes y materia orgánica. El carbono orgánico total se cuantificó mediante el método Walkley-Black, la reserva de carbono se estimó siguiendo las directrices del IPCC (2006), y los factores asociados a su distribución se evaluaron mediante análisis de correlación y análisis de componentes principales. La distribución espacial se representó mediante interpolación por Ponderación Inversa de la Distancia (IDW).

Los resultados evidenciaron contenidos de carbono orgánico entre 0,46 % y 1,38 % (promedio: 0,92 %) y reservas entre 41,79 y 124,70 t C/ha (promedio: 83,8 t C/ha). El análisis de correlación mostró asociaciones principalmente con las bases totales, el pH y el aluminio intercambiable, mientras que los dos primeros componentes principales explicaron el 63,33 % de la variabilidad total. La distribución espacial presentó un patrón heterogéneo, con mayores reservas en la zona central del humedal y menores valores en sectores periféricos. A partir de la reserva promedio se estimó un almacenamiento de 341,74 t C para el área efectivamente estudiada (4,078 ha) y una reserva potencial de 537,57 t C para la superficie total del humedal. Estos resultados resaltan la importancia del humedal El Charco-Oasis como reservorio de carbono en un contexto urbano y como apoyo a estrategias locales de mitigación del cambio climático, en concordancia con los ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ODS 13 (Acción por el clima) y ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

Palabras clave: Humedales urbanos, reserva de carbono, método Walkley-Black, análisis multivariado, distribución espacial, servicios ecosistémicos

Abstract

This study assessed the soil organic carbon storage capacity of El Charco–Oasis wetland, an urban ecosystem located in Villavicencio, Meta, Colombia, in order to quantify its contribution as a carbon sink. Seven sampling sites were established through a purposive sampling design that accounted for the environmental heterogeneity of the ecosystem. At each site, a 10 m linear transect was established, and soil subsamples were collected to a depth of 60 cm and combined into composite samples. Soil physicochemical properties, including texture, bulk density, pH, nutrient content, and organic matter, were determined through laboratory analyses. Total organic carbon was quantified using the Walkley–Black method, carbon stocks were estimated following the IPCC (2006) guidelines, and the factors associated with carbon distribution were evaluated through correlation analysis and Principal Component Analysis (PCA). Spatial distribution patterns were represented using Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation.

The results revealed soil organic carbon contents ranging from 0.46% to 1.38% (mean: 0.92%) and carbon stocks ranging from 41.79 to 124.70 t C ha⁻¹ (mean: 83.8 t C ha⁻¹). Correlation analysis indicated that organic carbon was primarily associated with total exchangeable bases, soil pH, and exchangeable aluminum, whereas the first two principal components explained 63.33% of the total variability. Spatial distribution exhibited a heterogeneous pattern, with higher carbon stocks concentrated in the central sector of the wetland and lower values recorded in peripheral areas. Based on the mean carbon stock, soil carbon storage was estimated at 341.74 t C for the effectively surveyed area (4.078 ha) and 537.57 t C for the total wetland area. These findings underscore the importance of El Charco–Oasis wetland as a strategic carbon reservoir within an urban landscape and highlight its contribution to local climate change mitigation efforts. Furthermore, the estimated carbon stock exceeds the institutional carbon footprint reported for 2020 (215.86 t CO₂) and 2023 (315.07 t CO₂), demonstrating its potential role in carbon offsetting. The ecosystem also contributes to the achievement of SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 13 (Climate Action), and SDG 15 (Life on Land).

Keywords: Urban wetlands, carbon stock, Walkley–Black method, multivariate analysis, spatial distribution, ecosystem services.

Introducción

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos ambientales a escala global y se encuentra estrechamente relacionado con el incremento sostenido de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, especialmente del dióxido de carbono (CO₂), derivado de actividades antrópicas como la deforestación, la transformación del uso del suelo y la expansión urbana (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2006; Schlesinger y Bernhardt, 2013; IPCC, 2014). Frente a este escenario, los ecosistemas naturales desempeñan un papel fundamental en la regulación climática al actuar como reservorios y sumideros de carbono, contribuyendo a la mitigación del calentamiento global (Lal, 2004).

Entre estos ecosistemas, los humedales destacan por su elevada productividad biológica y por su capacidad para almacenar grandes cantidades de carbono, particularmente en sus suelos (Odum y Barrett, 2006). Las condiciones de saturación hídrica y los ambientes anaerobios reducen la velocidad de descomposición de la materia orgánica, favoreciendo la acumulación y estabilidad del carbono a largo plazo (Bridgham et al., 2006; Mitsch & Gosselink, 2015). Debido a estas características, son considerados uno de los mayores reservorios de carbono del planeta (IPCC, 2014).

Su relevancia ecológica y climática ha sido reconocida internacionalmente mediante la Convención Ramsar, la cual resalta su contribución a la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, entre ellos la regulación climática asociada al secuestro y almacenamiento de carbono (Convención Ramsar, 2018). Esta función adquiere especial importancia en los humedales urbanos, ecosistemas que además favorecen la regulación hídrica, la reducción del riesgo de inundaciones, la conservación de la biodiversidad y la regulación microclimática en ciudades sometidas a procesos acelerados de transformación territorial (McInnes, Everard y Irvine, 2017; Ramsar Convention Secretariat, 2018). Su presencia contribuye al mejoramiento de la calidad ambiental urbana y fortalece la resiliencia de las ciudades frente a los efectos del cambio climático. Sin embargo, la expansión urbana, la contaminación, los rellenos y las alteraciones hidrológicas continúan comprometiendo su estructura, funcionalidad y capacidad para proveer estos servicios ecosistémicos.

En Colombia, pese a la amplia diversidad de humedales existentes, la información científica relacionada con la cuantificación de reservas de carbono continúa siendo limitada,

particularmente en ecosistemas urbanos y periurbanos. Diversos estudios han demostrado que el suelo constituye el principal depósito de carbono en estos ambientes, superando ampliamente el almacenamiento registrado en la biomasa aérea (Novoa y Sánchez, 2016; Aponte et al., 2021; Coral, 2022). Esta información resulta fundamental para respaldar estrategias de conservación, restauración ecológica, gestión ambiental y mitigación del cambio climático. No obstante, la mayor parte de las investigaciones se ha desarrollado en humedales rurales o de alta montaña, manteniéndose importantes vacíos de información en contextos urbanos.

En la Orinoquía colombiana, investigaciones recientes han evidenciado la importancia de morichales y humedales en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo, especialmente en los horizontes superficiales donde interactúan la vegetación, las propiedades edáficas y la dinámica hidrológica (Orozco-Hueje et al., 2023). A pesar de ello, en Villavicencio los estudios orientados a cuantificar reservas de carbono en suelos de humedales urbanos siguen siendo escasos, limitando la formulación de estrategias de manejo y conservación sustentadas en información local.

El humedal El Charco-Oasis, ubicado en el área urbana de Villavicencio y declarado Área de Recreación por CORMACARENA mediante el Acuerdo No. PS-GJ.1.2.42.2.11.011 de 2011, forma parte de la red de humedales urbanos identificados en el municipio (Garzón Cadena, 2021). Investigaciones recientes han destacado su importancia en la captura de carbono asociada a la biomasa vegetal y en la regulación térmica local (Buitrago y López, 2021; Cruz y Vásquez, 2024). Sin embargo, la cuantificación del carbono almacenado en el suelo, considerado el principal reservorio de carbono en los ecosistemas de humedal (Lal, 2004; IPCC, 2014), permanece sin ser evaluada.

En consecuencia, persiste un vacío de información respecto a la magnitud de las reservas de carbono edáfico presentes en el humedal El Charco-Oasis y a los factores que condicionan su distribución espacial. La presente investigación aborda esta necesidad mediante la determinación de la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo del ecosistema, aportando información científica local para fortalecer los procesos de conservación, restauración y gestión sostenible de los humedales urbanos de Villavicencio. Asimismo, los resultados constituyen una base técnica para futuras estrategias de gestión ambiental y adaptación al cambio climático en el ámbito local, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), 13 (Acción por el clima) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Determinar la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo del humedal El Charco-Oasis en Villavicencio, Meta, a partir de la cuantificación del carbono orgánico total (COT).

1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del suelo del humedal El Charco-Oasis para evaluar su relación con el contenido de carbono orgánico.
- Estimar el contenido de carbono orgánico total en el suelo del humedal El Charco-Oasis mediante la aplicación del método Walkley-Black.
- Evaluar la distribución espacial del carbono orgánico en el suelo del humedal El Charco-Oasis.

2. Antecedentes

Los humedales desempeñan un papel fundamental en la regulación del ciclo global del carbono debido a su elevada capacidad de almacenamiento, principalmente en los suelos. Aunque estos ecosistemas cubren únicamente entre el 5 % y el 8 % de la superficie terrestre, concentran aproximadamente entre el 20 % y el 30 % del carbono orgánico del suelo a nivel mundial (Mitsch & Gosselink, 2015). Esta capacidad se explica por las condiciones anaerobias predominantes en los suelos inundados, las cuales ralentizan los procesos de descomposición de la materia orgánica y favorecen la acumulación de carbono en sedimentos estables durante largos periodos de tiempo.

Diversos estudios han cuantificado las reservas y tasas de acumulación de carbono en suelos de humedales. Hansen y Nestlerode (2014) evaluaron la densidad de carbono en humedales costeros del Golfo de México, encontrando valores de almacenamiento entre 34 y 47 Mg C/ha en los primeros 10 a 15 cm del suelo, confirmando la eficiencia de estos ecosistemas como sumideros de carbono. De forma complementaria, Nyman et al. (1993) demostraron que, en humedales de agua dulce, la estabilización del carbono depende de la interacción entre la hidrología y la vegetación, donde la actividad radicular y la formación de turba favorecen la retención de carbono, mientras que el régimen de inundación regula los procesos de oxidación y mineralización.

Además de su relevancia ecológica, los humedales urbanos han adquirido una creciente importancia debido a los múltiples servicios ecosistémicos que proporcionan en territorios sometidos a intensos procesos de urbanización. Estos ecosistemas contribuyen a la regulación hídrica, la reducción del riesgo de inundaciones, la conservación de la biodiversidad, la regulación microclimática y el almacenamiento de carbono, constituyéndose en elementos estratégicos para la adaptación al cambio climático y la sostenibilidad urbana (McInnes, Everard & Irvine, 2017; Ramsar Convention Secretariat, 2018). No obstante, las presiones derivadas de la expansión urbana, la fragmentación del paisaje, la contaminación y las alteraciones hidrológicas pueden afectar significativamente su capacidad para conservar carbono y mantener su funcionalidad ecológica.

En ecosistemas de montaña, particularmente en humedales altoandinos, se han reportado valores elevados de almacenamiento de carbono en el suelo. Hidalgo et al. (2012) determinaron que el humedal de Yanayacu, en Perú, almacena aproximadamente 680,8 t C/ha en el suelo, representando más del 96 % del carbono total del ecosistema. Investigaciones posteriores

desarrolladas por Fernández Lucero (2016), Hribljan et al. (2016) y Aponte et al. (2021) corroboran que el suelo constituye el principal reservorio de carbono en estos ambientes, superando ampliamente la biomasa aérea debido a la combinación de bajas temperaturas, alta humedad y reducidas tasas de descomposición de la materia orgánica.

En Colombia, diferentes investigaciones han evidenciado la alta capacidad de los humedales para almacenar carbono en el suelo. Coral (2022), en el humedal Ramsar Laguna de la Cocha, reportó valores de hasta 542 Mg C/ha en suelos de páramo asociados a Andisoles de origen volcánico, significativamente superiores a los registrados en áreas transformadas por actividades agropecuarias. La autora identificó que la cobertura vegetal y las condiciones climáticas ejercen una influencia importante sobre la acumulación de carbono, especialmente en los primeros 30 cm del suelo. De manera similar, Novoa y Sánchez (2016) evaluaron el almacenamiento de carbono en los humedales El Coco, en Puerto Salgar (Cundinamarca), encontrando valores promedio de 729,86 t C/ha en sedimentos y registros máximos de 1.161,5 t C/ha, evidenciando la elevada variabilidad espacial característica de estos ecosistemas y su potencial como sumideros de carbono.

En la Orinoquía colombiana, los estudios relacionados con carbono en suelos de ecosistemas inundables han sido más limitados. Orozco-Hueje et al. (2023) evaluaron el carbono orgánico del suelo en morichales de la altillanura colombiana, registrando valores promedio entre 45 y 58 t C/ha en los primeros 30 cm de profundidad. Los autores resaltan que la acumulación de carbono se encuentra estrechamente asociada a las condiciones hidrológicas y a las características edáficas propias de estos ambientes. Complementariamente, Fernández-Martínez (2020) desarrolló un modelo predictivo para estimar las reservas de carbono del suelo en la estación Carimagua (Meta), integrando variables como densidad aparente, textura y datos espectrales, lo que permitió identificar patrones espaciales de almacenamiento y proponer herramientas de apoyo para el monitoreo y la gestión de estos ecosistemas.

A nivel local, el humedal El Charco-Oasis, ubicado en el municipio de Villavicencio, ha sido objeto de investigaciones que resaltan su importancia ecológica dentro del contexto urbano. Buitrago y López (2021) evidenciaron su función en la regulación térmica, demostrando que este ecosistema reduce la temperatura ambiente entre 2,7 °C y 3,4 °C en un radio aproximado de 90 m, contribuyendo a mitigar los efectos de la isla de calor urbana. Posteriormente, Torres Basto (2023) estimó la capacidad de captura de carbono de *Mimosa trianae* Benth mediante ecuaciones

alométricas propuestas para Colombia por el IDEAM, encontrando una contribución estimada de 111,67 t CO₂ asociada a la biomasa vegetal, sin considerar el carbono almacenado en el suelo.

Finalmente, Cruz y Vásquez (2024) evaluaron el potencial del humedal El Charco-Oasis como sumidero de carbono a partir de la biomasa aérea y subterránea de especies leñosas y palmas, estimando un almacenamiento aproximado de 2,68 t C/ha y destacando a *Guarea guidonia* como la especie con mayor aporte dentro del ecosistema. Aunque este estudio amplió el conocimiento sobre la captura de carbono desde el componente vegetal, no abordó la cuantificación de las reservas presentes en el suelo. Considerando que múltiples investigaciones reconocen al suelo como el principal reservorio de carbono en los ecosistemas de humedal, persiste un vacío de información relacionado con la magnitud de las reservas de carbono edáfico y con los factores que condicionan su distribución espacial en el humedal El Charco-Oasis, aspecto que constituye el eje central de la presente investigación.

3. Marco teórico

El almacenamiento de carbono en los ecosistemas terrestres se sustenta en el funcionamiento del ciclo global del carbono, el cual describe los flujos e intercambios de este elemento entre la atmósfera, la biosfera, la hidrosfera y la litosfera. Dentro de este sistema, los suelos constituyen uno de los principales reservorios de carbono orgánico debido a su capacidad para acumular, estabilizar y liberar carbono mediante procesos biogeoquímicos que influyen directamente en la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO_2) y, por ende, en la regulación climática (Lal, 2004; IPCC, 2006; FAO, 2020). Esta función estratégica del suelo como reservorio de carbono es reconocida a nivel nacional en el Código de Recursos Naturales Renovables (Decreto 2811 de 1974), el cual define el suelo como un recurso natural de interés público cuyo manejo debe orientarse hacia su conservación y uso sostenible.

El carbono presente en el suelo se clasifica en carbono orgánico del suelo (COS) y carbono inorgánico del suelo (CIS), siendo el primero el de mayor relevancia desde el punto de vista ecológico y climático, al estar asociado a residuos vegetales y animales en distintos grados de descomposición, así como a compuestos orgánicos estabilizados mediante interacciones físicas y químicas con las partículas minerales (Nelson & Sommers, 1982; FAO, 2020). El COS es considerado un indicador de la calidad y salud del suelo, ya que influye directamente en propiedades como la estructura, la porosidad, la retención de humedad, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes (Lal, 2004; FAO 2006; Coral, 2022), aspectos que se encuentran alineados con los principios de conservación del suelo establecidos en la Política para la Gestión Sostenible del Suelo en Colombia (2016).

La dinámica del COS está controlada por el balance entre las entradas de carbono, derivadas principalmente de la productividad vegetal y el aporte de residuos orgánicos, y las salidas asociadas a los procesos de descomposición y mineralización. Cuando las tasas de entrada superan a las de salida, se favorece la acumulación de carbono en el suelo; por el contrario, disturbios como el cambio en el uso del suelo, la compactación y la alteración del régimen hidrológico pueden generar pérdidas significativas de carbono previamente almacenado (IPCC, 2006; Lal, 2004; FAO, 2020). En coherencia con ello, la Ley 99 de 1993 establece que la planificación ambiental debe priorizar la protección de ecosistemas estratégicos y la prevención del deterioro de los recursos naturales.

Los humedales adquieren una relevancia particular por su elevada capacidad de almacenar carbono, especialmente en el suelo. Las condiciones de saturación hídrica generan ambientes con bajo contenido de oxígeno, lo que limita la actividad microbiana aerobia y ralentiza la descomposición de la materia orgánica, favoreciendo la acumulación progresiva de carbono en sedimentos orgánicos relativamente estables a largo plazo (Bridgham et al., 2006; Mitsch & Gosselink, 2015). Estas características sustentan su reconocimiento internacional como ecosistemas estratégicos para la regulación climática, principio incorporado en la Convención Ramsar sobre los Humedales y adoptado por Colombia mediante la Ley 357 de 1997.

Investigaciones desarrolladas en humedales de alta montaña han demostrado que la mayor concentración de carbono orgánico del suelo se localiza en los primeros horizontes edáficos, particularmente en los primeros 30 cm, donde existe una estrecha interacción entre la vegetación, las propiedades fisicoquímicas del suelo y la dinámica hídrica (Benavides et al., 2013; Aponte et al., 2021; Coral, 2022). Esta distribución vertical del carbono se relaciona con la acumulación superficial de residuos orgánicos y con procesos de humificación favorecidos por condiciones de baja temperatura y alta humedad.

Desde el enfoque de los servicios ecosistémicos, los humedales proporcionan beneficios esenciales para el bienestar humano, entre los cuales se destaca la regulación climática al estar directamente asociada con la captura y almacenamiento de gases de efecto invernadero, particularmente CO₂ (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Convención Ramsar, 2018). Esta función es coherente con los lineamientos de la Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia (2002), la cual orienta su manejo bajo principios de conservación y uso racional.

El contenido de COS se encuentra estrechamente relacionado con diversas propiedades edáficas. Variables como la materia orgánica, el nitrógeno total, la textura, la densidad aparente, el pH y la capacidad de intercambio catiónico influyen directamente en la estabilización del carbono en el suelo (Nelson y Sommers, 1982; Lal, 2004; Bolívar Gamboa et al., 2021; Coral, 2022). Suelos con baja densidad aparente, alta porosidad y altos contenidos de materia orgánica tienden a presentar mayores reservas de carbono, mientras que suelos compactados o sometidos a disturbios presentan menores capacidades de almacenamiento.

El secuestro de carbono se define como el proceso mediante el cual el carbono es captado de la atmósfera y almacenado en reservorios naturales como los suelos y la biomasa vegetal (IPCC, 2006; Lal, 2008). En los humedales, este proceso está estrechamente vinculado a la interacción

entre la vegetación, el régimen hidrológico y las características edáficas, lo que refuerza su función como ecosistemas estratégicos frente al cambio climático, principio incorporado en la Ley 1931 de 2018 sobre gestión del cambio climático en Colombia.

La estimación del contenido de carbono orgánico del suelo requiere el uso de métodos analíticos confiables. Entre los más empleados se encuentran la combustión seca y el método Walkley-Black, el cual se fundamenta en la oxidación del carbono orgánico mediante dicromato de potasio en medio ácido y ha sido ampliamente utilizado en estudios de suelos tropicales por su simplicidad, bajo costo y confiabilidad para evaluaciones comparativas (Walkley & Black, 1934; Nelson & Sommers, 1982; FAO, 2020).

El análisis de las relaciones entre variables edáficas y el carbono orgánico del suelo suele apoyarse en herramientas estadísticas multivariadas como el Análisis de Componentes Principales (ACP), que permite identificar patrones y gradientes ambientales asociados a la distribución del carbono en el suelo (Coral, 2022; Orozco-Hueje et al., 2023). Este enfoque es coherente con los lineamientos técnicos promovidos para la evaluación de sumideros de carbono en ecosistemas terrestres.

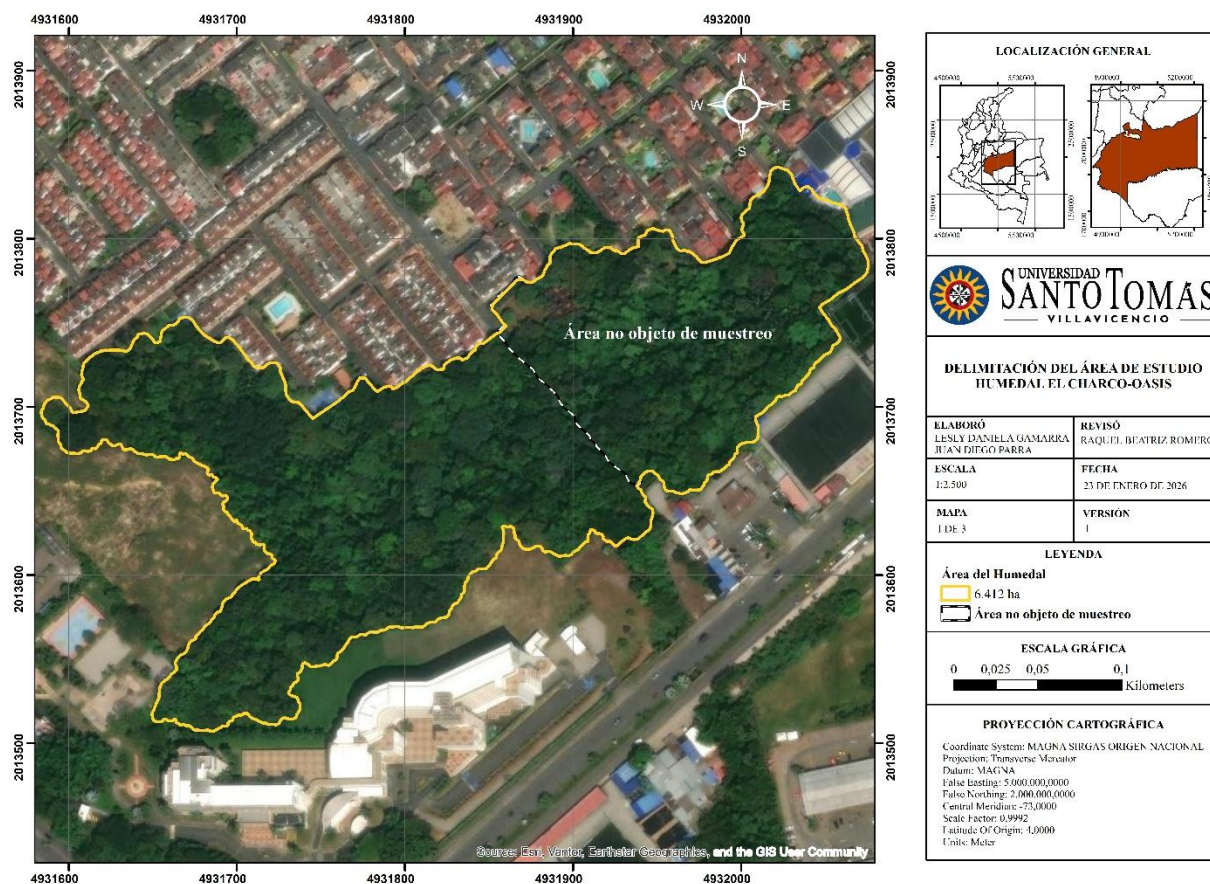
4. Metodología

4.1. Fase 1. Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del suelo del humedal

4.1.1 Reconocimiento de campo y definición de puntos de muestreo

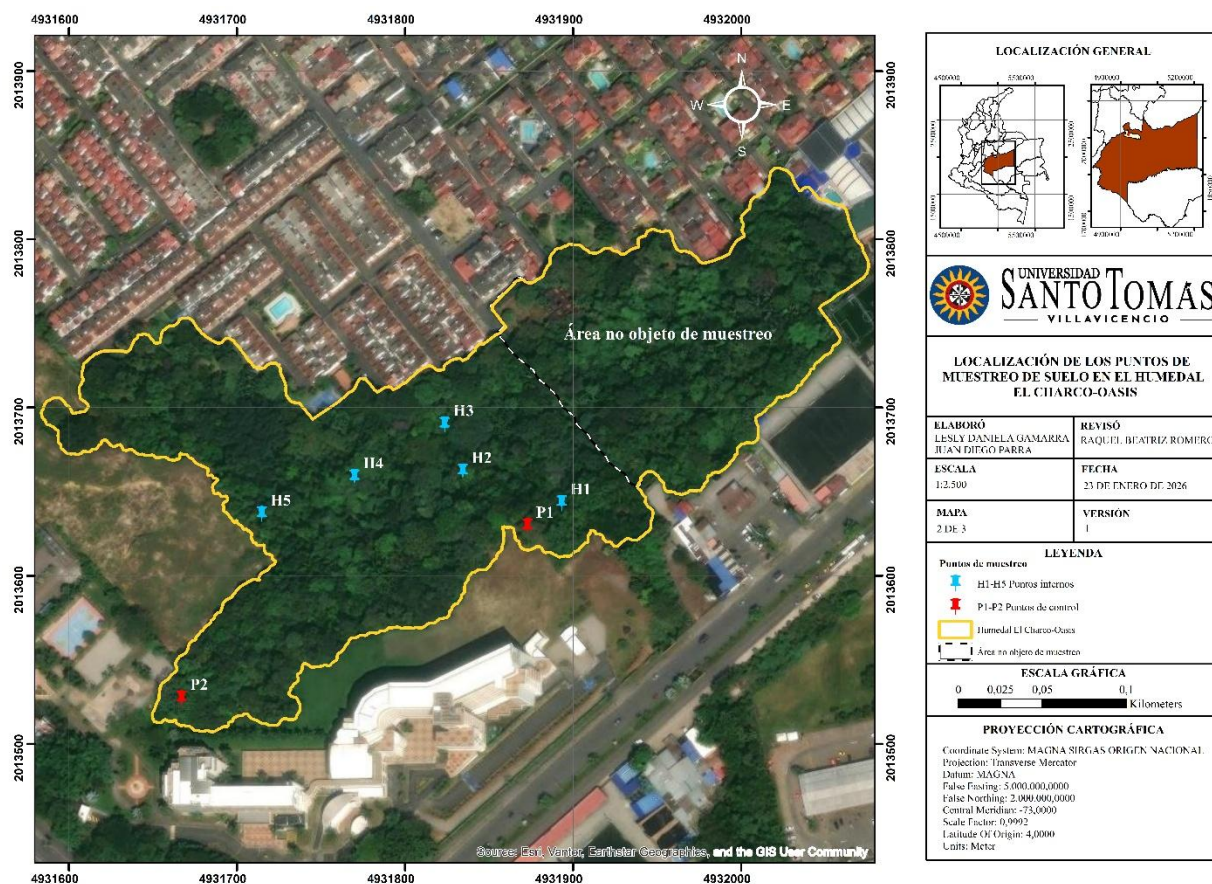
Se realizó una salida de reconocimiento al humedal El Charco-Oasis con el fin de identificar las condiciones generales del ecosistema y definir los sitios para la toma de muestras de suelo destinadas a la determinación del carbono orgánico total (COT). Durante esta actividad se evaluaron aspectos relacionados con la cobertura vegetal, las condiciones de humedad del terreno, la dinámica hídrica y las condiciones de accesibilidad presentes en el área de estudio.

Como resultado de este reconocimiento se identificaron limitaciones de acceso asociadas a las características físicas del terreno y a restricciones de ingreso en sectores localizados fuera del predio de la Universidad Santo Tomás. Por esta razón, fue necesario delimitar el área efectivamente considerada dentro del diseño de muestreo. La Figura 1 presenta la delimitación del área de estudio establecida para la investigación.

Figura 1 Delimitación del área de estudio en el humedal El Charco-Oasis.

El humedal El Charco-Oasis presenta una superficie total de 6,412 ha. Sin embargo, debido a las restricciones de acceso identificadas durante el reconocimiento de campo, se delimitó un área no objeto de muestreo de 2,334 ha, equivalente al 36,4 % de la superficie total del humedal. En consecuencia, el área efectivamente considerada para el desarrollo del estudio correspondió a 4,078 ha, representando el 63,6 % de la superficie total del ecosistema.

Una vez delimitada el área de estudio, se procedió a la selección de los puntos de muestreo mediante un muestreo no probabilístico de tipo dirigido, considerando la heterogeneidad ambiental del ecosistema y las condiciones de accesibilidad observadas durante el reconocimiento de campo. Se definieron siete puntos de muestreo, de los cuales cinco correspondieron a puntos internos ubicados dentro del humedal (H1-H5) y dos a puntos de control localizados en zonas de borde (P1 y P2). La distribución espacial de estos puntos se presenta en la Figura 2.

Figura 2 Localización de los puntos de muestreo establecidos en el humedal El Charco-Oasis.

La distribución de los puntos permitió abarcar diferentes sectores del área de estudio, incluyendo zonas internas del humedal y sectores de borde utilizados como puntos de control. Esta disposición buscó incorporar la variabilidad ambiental presente dentro del ecosistema y facilitar la comparación de las propiedades del suelo entre áreas con diferentes condiciones ecológicas.

Las coordenadas geográficas correspondientes a cada punto de muestreo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis

Punto	Latitud (N)	Longitud (O)
P1	4° 7'23.21"	73°36'50.59"
P2	4° 7'19.87"	73°36'57.27"
H1	4° 7'23.66"	73°36'49.93"
H2	4° 7'24.27"	73°36'51.84"
H3	4° 7'25.18"	73°36'52.19"
H4	4° 7'24.16"	73°36'53.93"

Punto	Latitud (N)	Longitud (O)
H5	4° 7'23.44"	73°36'55.72"

Con el fin de documentar las condiciones observadas durante el reconocimiento y la localización de los puntos seleccionados, se realizó un registro fotográfico de los sitios de muestreo. La Figura 3 presenta las condiciones generales observadas en cada uno de los puntos establecidos.

Figura 3 Registro fotográfico de los puntos de muestreo en el humedal El Charco-Oasis.



A partir del registro fotográfico se evidencian diferencias entre los puntos ubicados al interior del humedal (H1-H5) y aquellos localizados en zonas de borde (P1 y P2). Los puntos internos presentan una mayor densidad de cobertura vegetal, acumulación de hojarasca y condiciones asociadas a una mayor humedad del suelo. Asimismo, durante las observaciones de campo se identificaron evidencias de bioturbación superficial asociadas a hormigueros en algunos sectores del humedal. Por su parte, los puntos de borde presentan una menor cobertura vegetal y una mayor exposición superficial del suelo.

En particular, el punto H5 presentó características diferenciales asociadas a su ubicación en un sector periférico del humedal, donde se observaron indicios de intervención antrópica

relacionados con actividades pecuarias desarrolladas en áreas adyacentes al ecosistema. Estas condiciones podrían influir en características físicas del suelo como la compactación y la cobertura vegetal presente en el sitio.

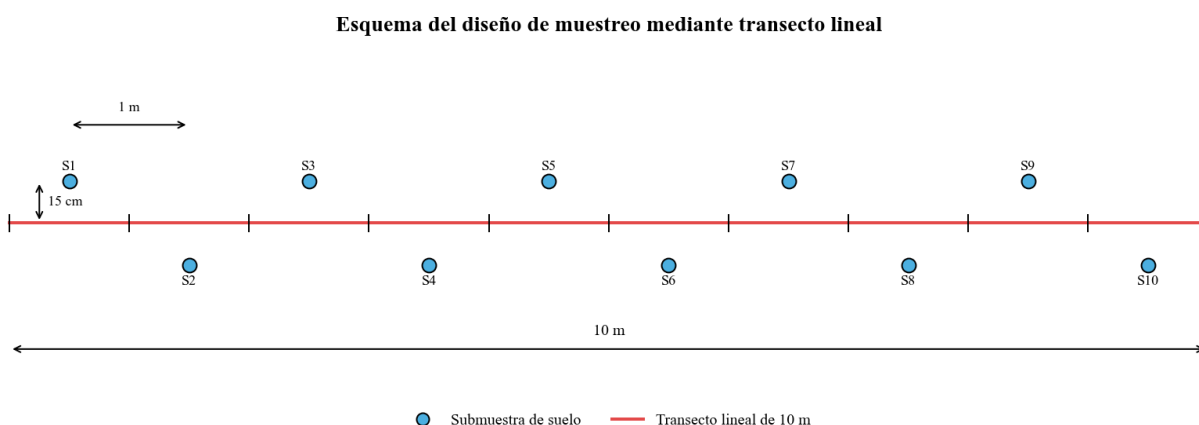
4.1.2 *Diseño de muestreo y recolección de muestras de suelo*

Una vez definidos los puntos de muestreo, se realizó la recolección de muestras de suelo mediante un diseño sistemático basado en transectos lineales. En cada punto se estableció un transecto de 10 m de longitud, a lo largo del cual se obtuvieron diez submuestras de suelo distribuidas a intervalos regulares de 1 m.

Las submuestras fueron tomadas de forma alternada a ambos lados de la línea central del transecto, siguiendo un patrón en zigzag, con el propósito de incorporar la variabilidad espacial presente dentro de cada punto de muestreo y obtener una muestra más representativa de las condiciones del suelo. Teóricamente, las submuestras se ubicaron a una distancia lateral aproximada de 15 cm respecto al eje central del transecto. No obstante, durante el trabajo de campo fue necesario realizar ajustes menores en algunas ubicaciones debido a las condiciones propias del terreno, la presencia de raíces superficiales, obstáculos naturales y las características de la cobertura vegetal, procurando mantener en todo momento la distribución sistemática propuesta.

La Figura 4 presenta de manera esquemática el diseño de muestreo implementado en cada punto, indicando la disposición del transecto, la separación entre submuestras y el patrón de distribución empleado durante la toma de muestras.

Figura 4 *Esquema del diseño de muestreo de suelo mediante transecto lineal.*



Nota. El esquema ilustra la disposición de un transecto lineal de 10 m y la ubicación de las diez submuestras distribuidas sistemáticamente cada 1 m mediante un patrón alternado en zigzag.

Las muestras fueron extraídas utilizando un barreno metálico de 30 cm de longitud. Considerando que la profundidad de muestreo establecida para el estudio fue de 60 cm, el barreno se introdujo de manera consecutiva en dos ocasiones para completar el perfil requerido en cada punto de muestreo.

Posteriormente, las diez submuestras obtenidas en cada transecto fueron homogenizadas para conformar una muestra compuesta representativa del respectivo punto de muestreo. Finalmente, los puntos fueron georreferenciados mediante sistema de posicionamiento global (GPS) y registrados en campo con el fin de garantizar su correcta identificación y trazabilidad durante el desarrollo de la investigación.

4.1.3 Determinación de propiedades fisicoquímicas del suelo

Las propiedades fisicoquímicas del suelo fueron evaluadas como complemento a la determinación del carbono orgánico total, con el fin de caracterizar las condiciones edáficas del humedal El Charco-Oasis y analizar posteriormente su relación con el almacenamiento y la distribución espacial del carbono orgánico en el suelo. La información obtenida constituyó la base para los análisis de correlación y estadística multivariada desarrollados en las fases posteriores de la investigación.

Las muestras compuestas recolectadas en los siete puntos de muestreo fueron acondicionadas, rotuladas y divididas en dos fracciones para su procesamiento en laboratorio. Una de las fracciones fue remitida al Laboratorio de Suelos de la Universidad de los Llanos, donde se realizó el análisis químico de fertilidad mediante metodologías estandarizadas para caracterización de suelos. En este laboratorio se determinaron las variables pH, nitrógeno total (Nt), materia orgánica (MO), fósforo disponible (P), aluminio intercambiable (Al), bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico (CO), azufre (S), textura y micronutrientes (B, Cu, Mn, Fe y Zn).

La determinación del nitrógeno total se efectuó mediante el método Kjeldahl; el fósforo disponible mediante el método Bray II; el aluminio intercambiable mediante extracción con KCl

1 N; las bases intercambiables y la capacidad de intercambio catiónico efectiva mediante extracción con acetato de amonio a pH 7; los micronutrientes mediante extracción con DTPA; y el azufre mediante extracción con fosfato monobásico de calcio. La medición del pH se realizó mediante lectura potenciométrica en suspensión suelo (1:1). Por su parte, la materia orgánica y el carbono orgánico fueron determinados mediante el método de oxidación húmeda Walkley–Black, procedimiento utilizado por el laboratorio para la cuantificación de carbono orgánico en suelos. La distribución de las fracciones texturales (arena, limo y arcilla) fue determinada mediante el método de Bouyoucos, mientras que la clasificación textural se realizó utilizando el triángulo textural del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). El detalle de los métodos analíticos empleados y los resultados emitidos por el laboratorio se presentan en el Anexo 1.

Las condiciones de almacenamiento y transporte de las muestras se mantuvieron bajo criterios que minimizaran alteraciones físicas y químicas del material recolectado. Para ello, las muestras permanecieron almacenadas en bolsas herméticas, protegidas de la radiación solar directa y transportadas en recipientes cerrados hasta su procesamiento en laboratorio.

La segunda fracción de las muestras fue analizada en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás, Seccional Villavicencio, donde se determinaron los parámetros físicos no incluidos dentro del análisis químico externo. En esta etapa se evaluaron la humedad gravimétrica y la densidad aparente del suelo, variables necesarias para la posterior estimación de las reservas de carbono orgánico.

La humedad gravimétrica fue determinada con apoyo de una auxiliar de investigación mediante el método gravimétrico de secado en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante, siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 6230 (ICONTEC, 2017). Este procedimiento permite cuantificar el contenido de agua presente en el suelo con respecto a su masa seca. La humedad gravimétrica se calculó mediante la expresión presentada en la Ecuación 1.

Ecuación 1 *Humedad gravimétrica del suelo*

$$pW(\%) = \frac{(Pmh - Pc) - (PmsPc)}{(Pms - Pc)} \times 100$$

Donde: pW corresponde al contenido de humedad expresado en porcentaje con base en suelo seco; Pmh corresponde al peso de la cápsula más la muestra húmeda (g); Pms corresponde

al peso de la cápsula más la muestra seca después del secado en estufa (g); y P_c corresponde al peso de la cápsula vacía (g) (ICONTEC, 2017).

La densidad aparente fue determinada mediante el método del cilindro o núcleo de volumen conocido, siguiendo los procedimientos establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para la determinación de densidad aparente en suelos. Para ello se emplearon cilindros metálicos con un volumen de 50 cm³, los cuales permitieron obtener muestras de volumen conocido y posteriormente establecer la relación entre la masa de suelo seco y el volumen ocupado por la muestra. Este parámetro constituye una variable fundamental para la estimación de reservas de carbono orgánico en el suelo, debido a que permite convertir concentraciones de carbono en existencias expresadas por unidad de superficie. La densidad aparente se calculó mediante la expresión presentada en la Ecuación 2.

Ecuación 2 *Densidad aparente del suelo*

$$DA = \frac{M_{ss}}{V_c}$$

Donde: DA corresponde a la densidad aparente del suelo (g·cm⁻³); M_{ss} corresponde a la masa de suelo seco obtenida después del secado en estufa (g); y V_c corresponde al volumen interno del cilindro de muestreo (cm³) (IGAC, 2024).

4.2. Fase 2. Estimación del contenido de carbono orgánico total en el suelo

4.2.1 Determinación del carbono orgánico total mediante el método Walkley–Black

La cuantificación del carbono orgánico total (COT) se realizó a partir de los resultados analíticos emitidos por el Laboratorio de Suelos de la Universidad de los Llanos, entidad encargada de efectuar la determinación mediante el método de oxidación húmeda de Walkley–Black, conforme a los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 5403 (ICONTEC, 2021). Este método se fundamenta en la oxidación del carbono orgánico presente en la muestra de suelo mediante una solución de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) en medio ácido sulfúrico, seguida de la valoración del exceso de dicromato mediante titulación con sulfato ferroso amoniacal. Debido a su amplia aplicación en estudios edáficos, este procedimiento constituye uno

de los métodos de referencia para la determinación de carbono orgánico en suelos (Walkley & Black, 1934; ICONTEC, 2021).

La estimación del porcentaje de carbono orgánico oxidable total se realizó mediante la expresión presentada en la Ecuación 3.

Ecuación 3 *Porcentaje de carbono orgánico total en el suelo*

$$\% C_{orgánico} (fracción en masa) = \frac{(V_B - V_M) \times M \times 0,003 \times (100 + pW)}{W_m}$$

Donde: V_B es el volumen de la solución titulante (sulfato ferroso) empleada en el blanco, en mL; V_M corresponde al volumen de la solución titulante (sulfato ferroso) empleada en la muestra, en mL; M es la molaridad de la solución ferrosa ($M = V_D/V_{Bi}$, donde V_D son los mL de dicromato de potasio agregados al blanco correspondiente); 0,003 corresponde a la relación de carbono oxidado de acuerdo con lo siguiente:

$$\left(\frac{12 \text{ g C}}{1 \text{ mol}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol } K_2Cr_2O_7}{1 \text{ mol } FeSO_4}\right) \times \left(\frac{3 \text{ mol C}}{1 \text{ mol } K_2Cr_2O_7}\right) \times \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}}\right)$$

Por otro lado, pW es el % (fracción en masa) de humedad de la muestra expresada con base en suelo seco a 105°C (determinado según la NTC 6230 (ver Ecuación 1)); y W_m corresponde al peso de la muestra en g. (ICONTEC, 2021).

Posteriormente, el contenido de carbono orgánico total fue calculado mediante la corrección propuesta por Walkley y Black, considerando la eficiencia de oxidación del método, tal como se presenta en la Ecuación 4.

Ecuación 4 *Carbono orgánico total*

$$\% COT = \% \text{ Carbono orgánico oxidable total} \times 1,34$$

Donde: 1,34 es el factor de corrección (Walkley & Black, 1934; ICONTEC, 2021).

4.2.2 *Cálculo de la reserva de carbono orgánico en el suelo*

Los valores de carbono orgánico total obtenidos para cada punto de muestreo fueron integrados con la información de densidad aparente y profundidad de muestreo para estimar la

reserva de carbono orgánico almacenada en el suelo. La profundidad considerada correspondió a 60 cm, equivalente al espesor total del perfil evaluado durante el trabajo de campo.

La estimación de la reserva de carbono orgánico del suelo se realizó siguiendo las directrices metodológicas propuestas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2006), mediante la expresión presentada en la Ecuación 5.

Ecuación 5 *Reserva de carbono orgánico en el suelo*

$$RC \left(\frac{tC}{ha} \right) = COT \times DA \times P$$

Donde: *RC* corresponde a la reserva de carbono orgánico del suelo expresada en toneladas de carbono por hectárea, *COT* al contenido de carbono orgánico total (%) y *DA* a la densidad aparente del suelo ($g \cdot cm^{-3}$) y *P* a la profundidad en cm; siguiendo las directrices metodológicas del IPCC (2006).

Para garantizar la coherencia dimensional de la ecuación, se consideró que la densidad aparente ($g \cdot cm^{-3}$) expresa la masa de suelo por unidad de volumen, mientras que la profundidad (cm) representa el espesor del perfil evaluado. Al multiplicar la densidad aparente por la profundidad se obtiene la masa de suelo por unidad de superficie ($g \cdot cm^{-2}$). Posteriormente, al incorporar el contenido de carbono orgánico total (%) se estima la masa de carbono presente en dicho volumen de suelo.

La conversión a toneladas de carbono por hectárea se fundamenta en la equivalencia entre unidades de superficie y masa, donde 1 ha corresponde a 10^8 cm^2 y 1 tonelada equivale a 10^6 g . Bajo estas condiciones, el uso de COT en porcentaje, DA en $g \cdot cm^{-3}$ y P en cm permite que la expresión arroje directamente la reserva de carbono en tC/ha sin requerir factores de conversión adicionales. Este procedimiento coincide con metodologías empleadas en estudios de carbono orgánico del suelo donde el stock se calcula mediante la relación $SOCS = BD \times D \times \%C$ (IPCC, 2006; Buraka et al., 2022).

4.2.3 *Estimación de la reserva total de carbono en el humedal*

La reserva total de carbono orgánico almacenada en el suelo del humedal fue estimada a partir de la extrapolación de la reserva promedio de carbono obtenida para los puntos de muestreo hacia el área efectiva de estudio delimitada durante la fase de reconocimiento de campo. Debido a

las restricciones de acceso identificadas en sectores externos al predio de la Universidad Santo Tomás, la estimación se realizó exclusivamente para las 4,078 ha que conformaron el área efectivamente evaluada, evitando extrapolaciones sobre zonas que no fueron objeto de muestreo.

La reserva total de carbono orgánico del humedal se calculó mediante la expresión presentada en la Ecuación 6.

Ecuación 6 *Reserva total de carbono orgánico del humedal*

$$RT_C (tC) = RC \times A$$

Donde: RT_C corresponde a la reserva total de carbono orgánico almacenada en el área de estudio del humedal expresada en toneladas de carbono, RC a la reserva de carbono orgánico del suelo por unidad de área (tC/ha) y A al área efectiva de estudio considerada para la estimación (4,078 ha).

4.3. Fase 3. Evaluación de la distribución espacial del carbono orgánico en el suelo

4.3.1 *Análisis estadístico multivariado de las propiedades del suelo*

La evaluación de las relaciones entre el carbono orgánico y las propiedades fisicoquímicas del suelo se realizó mediante técnicas de estadística descriptiva, análisis de correlación y análisis multivariado. El procesamiento de la información se llevó a cabo en el entorno de programación Python empleando las librerías NumPy, Pandas, SciPy, Matplotlib y Scikit-learn, ampliamente utilizadas en el análisis estadístico de datos ambientales.

Los resultados obtenidos para las variables físicas y químicas del suelo fueron organizados en una matriz de datos que integró la información correspondiente a cada uno de los puntos de muestreo. Esta base de datos constituyó el insumo para la evaluación de las relaciones entre las propiedades edáficas y el carbono orgánico del suelo.

Previamente al análisis de correlación, se verificó el comportamiento estadístico de las variables mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, procedimiento recomendado para conjuntos de datos de tamaño reducido debido a su elevada potencia estadística para detectar desviaciones respecto a la distribución normal (Shapiro & Wilk, 1965). La hipótesis nula de esta prueba establece que los datos proceden de una distribución normal.

Con base en los resultados obtenidos, las asociaciones entre variables fueron evaluadas mediante el coeficiente de correlación de Pearson cuando se cumplió el supuesto de normalidad ($p > 0,05$) y mediante el coeficiente de correlación de Spearman cuando alguna de las variables presentó distribuciones no normales ($p \leq 0,05$). La aplicación de estos análisis permitió determinar la dirección, intensidad y significancia estadística de las relaciones existentes entre el carbono orgánico total y las propiedades fisicoquímicas del suelo (Zar, 2010).

La inclusión de los análisis de correlación tuvo como finalidad identificar relaciones bivariadas específicas entre pares de variables y reconocer aquellos atributos edáficos potencialmente asociados con los procesos de almacenamiento de carbono en el humedal. Este procedimiento permitió complementar la interpretación ecológica de los resultados mediante la evaluación individual de las asociaciones entre variables.

De manera complementaria, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP), técnica multivariada ampliamente utilizada para sintetizar la variabilidad de conjuntos de datos complejos mediante la transformación de variables originales potencialmente correlacionadas en un conjunto reducido de componentes ortogonales capaces de explicar la mayor proporción posible de la variabilidad observada (Legendre & Legendre, 2012; Jolliffe & Cadima, 2016).

A diferencia de los análisis de correlación, cuyo propósito es evaluar relaciones particulares entre pares de variables, el ACP permite identificar patrones multivariados, gradientes ambientales y agrupamientos asociados al comportamiento conjunto de las propiedades del suelo. En este sentido, ambas herramientas fueron empleadas de manera complementaria para obtener una comprensión integral de los factores relacionados con la distribución y almacenamiento del carbono orgánico en el ecosistema evaluado.

Debido a que las variables analizadas se encontraban expresadas en diferentes unidades de medida y rangos de variación, previamente a la ejecución del ACP se realizó un proceso de estandarización mediante transformación Z-score, evitando que variables con magnitudes numéricas mayores ejercieran una influencia desproporcionada sobre los resultados del análisis. La transformación utilizada se presenta en la Ecuación 7.

Ecuación 7 *Transformación Z-score*

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

Donde: Z corresponde al valor estandarizado, x al valor original de la variable, $\bar{x}$ a la media aritmética de la variable y σ a la desviación estándar.

El ACP fue ejecutado mediante la clase PCA de la librería Scikit-learn. A partir de este procedimiento se obtuvieron los componentes principales, los valores propios (eigenvalues), las cargas factoriales (loadings), los porcentajes de varianza explicada y la varianza acumulada de cada componente principal. Asimismo, se generaron diagramas de sedimentación (scree plot), gráficos de cargas factoriales y biplots, los cuales facilitaron la interpretación de las relaciones multivariadas entre las propiedades del suelo y la identificación de los factores con mayor influencia sobre la variabilidad observada en el sistema edáfico.

4.3.2 Análisis espacial de la distribución del carbono orgánico del suelo

La distribución espacial del carbono orgánico en el humedal fue evaluada mediante técnicas de interpolación espacial aplicadas a los puntos de muestreo georreferenciados. Como variable de entrada se utilizó la reserva de carbono orgánico del suelo (RC), expresada en toneladas de carbono por hectárea (tC/ha), calculada a partir de los resultados obtenidos durante la Fase 2 de la investigación (Chimner et al., 2019).

La representación espacial de esta variable se realizó mediante el método de ponderación inversa de la distancia (Inverse Distance Weighting - IDW), procedimiento determinístico que estima valores en ubicaciones no muestreadas a partir de la influencia ejercida por los puntos vecinos. Este método se fundamenta en el principio de autocorrelación espacial, según el cual las observaciones cercanas presentan mayor similitud que aquellas ubicadas a mayores distancias (Isaaks & Srivastava, 1989).

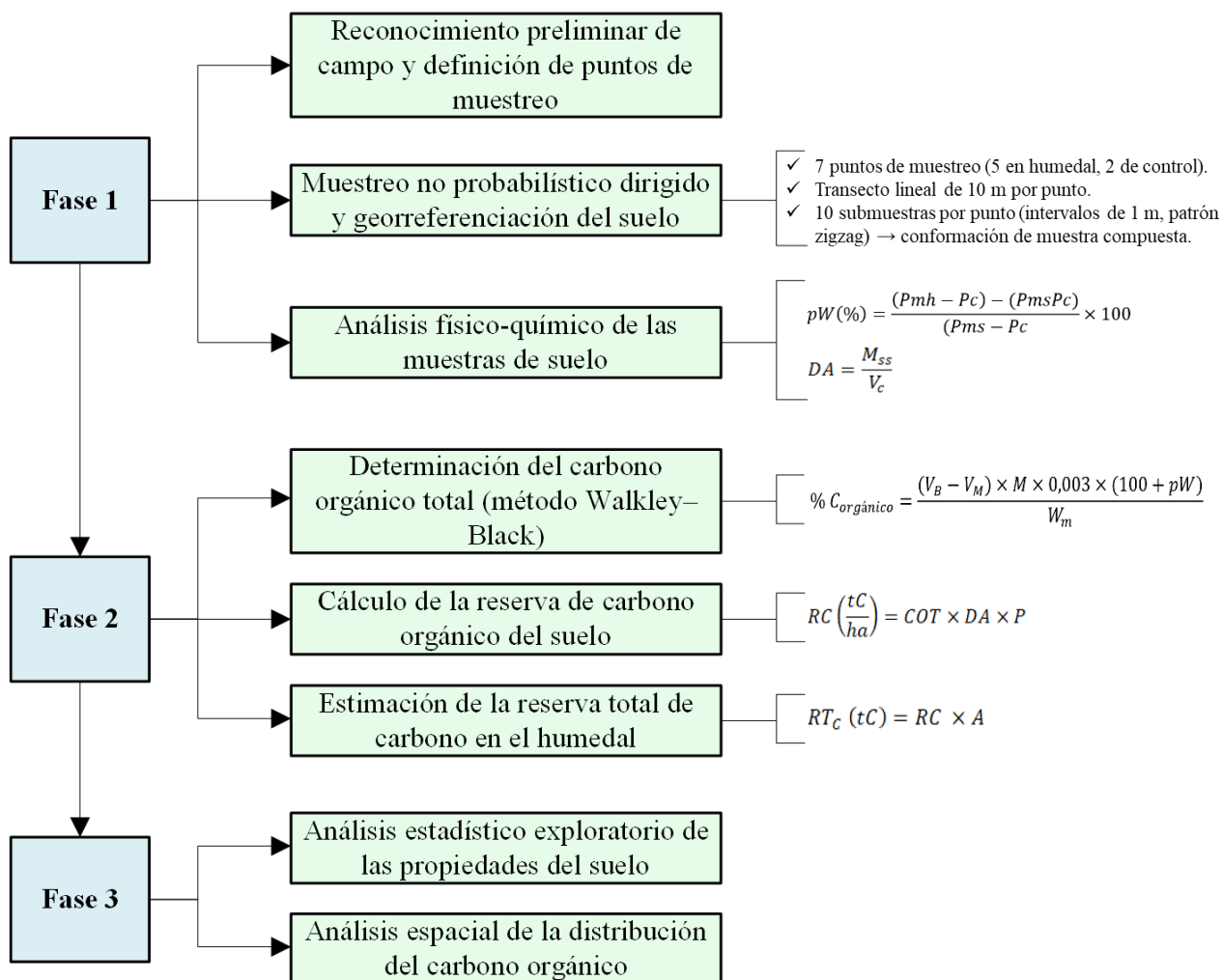
El método IDW ha sido ampliamente utilizado en estudios ambientales y edáficos debido a su capacidad para generar superficies continuas a partir de conjuntos de datos con un número limitado de observaciones, permitiendo identificar patrones espaciales y gradientes de distribución de variables ambientales (Li & Heap, 2014; Burrough et al., 2015).

El procesamiento espacial se desarrolló en el software ArcGIS. A partir de las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo y de los valores de reserva de carbono obtenidos para cada uno de ellos, se generó una superficie continua de distribución espacial mediante interpolación

IDW. Posteriormente, la superficie interpolada fue recortada utilizando el límite del área efectiva de estudio delimitada durante la fase de reconocimiento de campo.

Los mapas resultantes permitieron identificar zonas con diferente capacidad de almacenamiento de carbono dentro del humedal, facilitando el análisis de patrones espaciales y la interpretación de su relación con las características edáficas y ambientales del ecosistema.

Con el propósito de sintetizar el procedimiento metodológico desarrollado durante la investigación, la Figura 5 presenta el diagrama general de actividades correspondiente a las tres fases del estudio: i) caracterización de las propiedades fisicoquímicas del suelo, ii) estimación del contenido y la reserva de carbono orgánico y iii) evaluación de la distribución espacial del carbono orgánico en el humedal.

Figura 5 Diagrama metodológico

5. Análisis y discusión de resultados

5.1. Caracterización de las propiedades fisicoquímicas del suelo del Humedal

5.1.1 Propiedades físicas del suelo

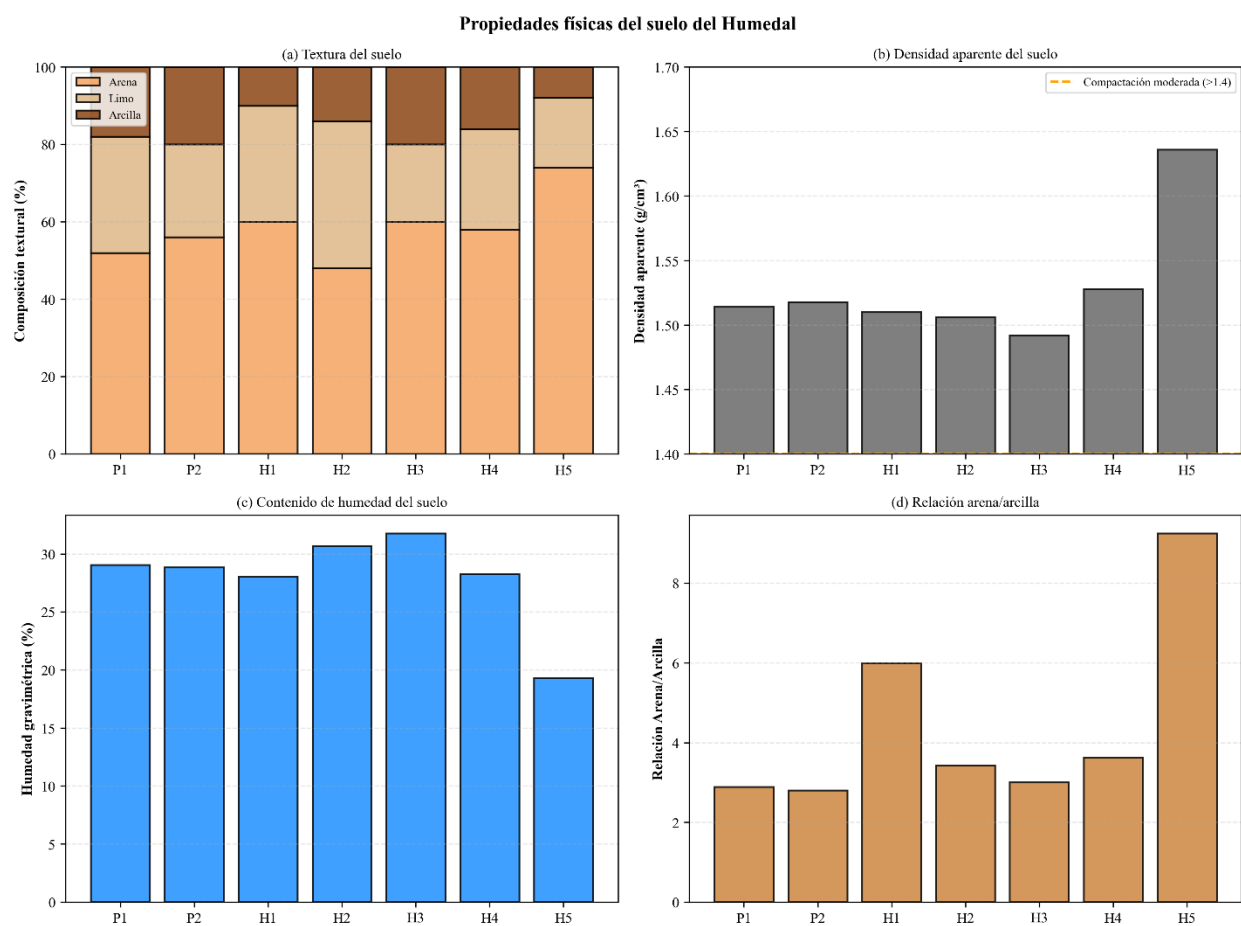
La caracterización física del suelo del humedal El Charco-Oasis evidenció variaciones espaciales entre los puntos de muestreo, reflejando diferencias en las condiciones ambientales presentes dentro del ecosistema. La Tabla 2 presenta los valores de las propiedades físicas determinadas, incluyendo la composición textural, la densidad aparente y el contenido de humedad gravimétrica (Gee y Or, 2002; Grossman y Reinsch, 2002).

Tabla 2 Propiedades físicas del suelo en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis.

Parámetro	Unidad	P1	P2	H1	H2	H3	H4	H5
<i>Arena</i>	%	52	56	60	48	60	58	74
<i>Limo</i>	%	30	24	30	38	20	26	18
<i>Arcilla</i>	%	18	20	10	14	20	16	8
<i>Textura</i>	-	F.L	F.Ar.A	F.A	F	F.Ar.A	F.A	F.A
<i>Humedad</i>	%	29,06	28,85	28,03	30,68	31,77	28,27	19,32
<i>Densidad aparente</i>	g/cm ³	1,514	1,518	1,51	1,506	1,492	1,528	1,636

Nota: P1 y P2 corresponden a puntos de control ubicados en la zona de borde del humedal, utilizados como referencia comparativa frente a los puntos internos (H1–H5). F.L = Franco limoso; F.Ar.A = Franco arcillo arenoso; F.A = Franco arenoso; F = Franco. Los valores de humedad gravimétrica y densidad aparente fueron determinados en laboratorio de la Universidad Santo Tomás, los datos detallados se presentan en los Anexos 2 y 3.

La Figura 6 ilustra gráficamente la variabilidad de estas propiedades físicas a lo largo de los puntos de muestreo, permitiendo identificar patrones espaciales relevantes para la comprensión de las condiciones edáficas del humedal.

Figura 6 *Propiedades físicas del suelo del humedal El Charco-Oasis.*

Nota: (a) Composición textural del suelo, (b) Densidad aparente, (c) Contenido de humedad gravimétrica, (d) Relación arena/arcilla.

El análisis granulométrico mostró predominancia de texturas francas y franco-arenosas (Figura 6a). El contenido de arena varió entre 48 % (H2) y 74 % (H5), constituyendo la fracción dominante en la mayoría de los puntos. El limo presentó valores entre 18 % (H5) y 38 % (H2), mientras que la arcilla fue la fracción menos abundante, con valores entre 8 % (H5) y 20 % (P2 y H3).

Los puntos de borde P1 y P2 presentaron texturas franco-limosa y franco-arcillo-arenosa, respectivamente, con contenidos de arcilla entre 18 % y 20 %. Los puntos internos H1, H4 y H5 exhibieron textura franco-arenosa, mientras que H2 presentó textura franca y H3 textura franco-arcillo-arenosa. Las diferencias texturales observadas entre los puntos de muestreo evidencian la heterogeneidad física presente dentro del humedal, la cual puede estar asociada a variaciones en

los procesos de deposición de materiales y en la dinámica hidrológica del ecosistema (Brady y Weil, 2016).

El punto H5 presentó el mayor contenido de arena (74 %) y el menor contenido de arcilla (8 %). Esta composición podría reducir la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo. De acuerdo con Lal (2004), este tipo de condiciones puede favorecer una menor protección física de la materia orgánica frente a los procesos de descomposición. La relación arena/arcilla alcanzó un valor de 9,25 en H5 (Figura 6d), siendo notablemente superior al resto de los puntos, cuyos valores oscilaron entre 2,8 y 6,0.

La densidad aparente varió entre 1,492 g/cm³ (H3) y 1,636 g/cm³ (H5), con un promedio de $1,529 \pm 0,047$ g/cm³ (Figura 6b). Estos valores se encuentran dentro del rango reportado para suelos minerales con contenidos moderados de materia orgánica (Arshad et al., 1996). Los puntos de borde P1 y P2 presentaron valores similares de densidad aparente (1,514 y 1,518 g/cm³, respectivamente), mientras que los puntos internos mostraron una mayor variabilidad.

Todos los puntos evaluados presentaron valores de densidad aparente superiores a 1,4 g/cm³, umbral que suele asociarse con condiciones moderadas de compactación en suelos minerales. No obstante, la interpretación de este parámetro debe realizarse considerando conjuntamente la textura y las características particulares del suelo evaluado (Arshad et al., 1996).

El punto H5 registró la densidad aparente más elevada (1,636 g/cm³), valor superior al observado en los demás puntos de muestreo. Esta condición coincide con el mayor contenido de arena registrado en este punto, característica que puede influir en la organización estructural del suelo. Por su parte, H3 presentó la densidad aparente más baja (1,492 g/cm³). Este parámetro resulta fundamental para la estimación de reservas de carbono, debido a que determina la masa de suelo contenida en una unidad de volumen (IPCC, 2006).

El contenido de humedad gravimétrica varió entre 19,32 % (H5) y 31,77 % (H3) (Figura 6c). Los puntos de borde presentaron humedades cercanas al promedio general, con valores de 29,06 % para P1 y 28,85 % para P2. Los puntos internos mostraron una mayor heterogeneidad, destacándose H3 y H2 con los contenidos de humedad más elevados (31,77 % y 30,68 %, respectivamente).

Durante el trabajo de campo se observaron condiciones asociadas a una mayor disponibilidad de agua en algunos sectores del humedal, incluyendo suelo con apariencia húmeda en P2, presencia de lámina de agua superficial en H1 y cercanía al cuerpo de agua en H4. Estas

observaciones son consistentes con los mayores contenidos de humedad registrados en varios de los puntos internos.

El punto H5 presentó el menor contenido de humedad gravimétrica (19,32 %), condición que coincide con su elevada proporción de arena. De acuerdo con Rawls et al. (1982), los suelos con mayor contenido de arena suelen presentar una menor capacidad de retención hídrica debido al predominio de macroporos. La humedad del suelo constituye una variable clave en ecosistemas de humedal, debido a su influencia sobre la actividad microbiana y los procesos de transformación de la materia orgánica (Reddy y DeLaune, 2008).

Las propiedades físicas evaluadas evidencian una variabilidad espacial asociada a las condiciones ambientales presentes dentro del humedal. Los puntos de borde mostraron características relativamente homogéneas, mientras que los puntos internos reflejaron una mayor heterogeneidad en textura, humedad y densidad aparente. Particularmente, H2 y H3 registraron mayores contenidos de humedad y menores densidades aparentes, condiciones que sugieren ambientes potencialmente favorables para la acumulación de materia orgánica. En contraste, H5 presentó una combinación de textura más arenosa, mayor densidad aparente y menor contenido de humedad. Estas diferencias reflejan gradientes físicos e hidrológicos que caracterizan la dinámica edáfica del ecosistema (Reddy y DeLaune, 2008; Mitsch y Gosselink, 2015).

5.1.2 *Propiedades químicas del suelo*

Las propiedades químicas del suelo del humedal El Charco-Oasis presentaron variabilidad espacial entre los puntos de muestreo (Tabla 3). Los parámetros evaluados incluyeron pH, contenido de materia orgánica, nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico efectiva y disponibilidad de nutrientes, variables que influyen en los procesos de fertilidad y funcionamiento edáfico.

Tabla 3 *Propiedades químicas del suelo en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis.*

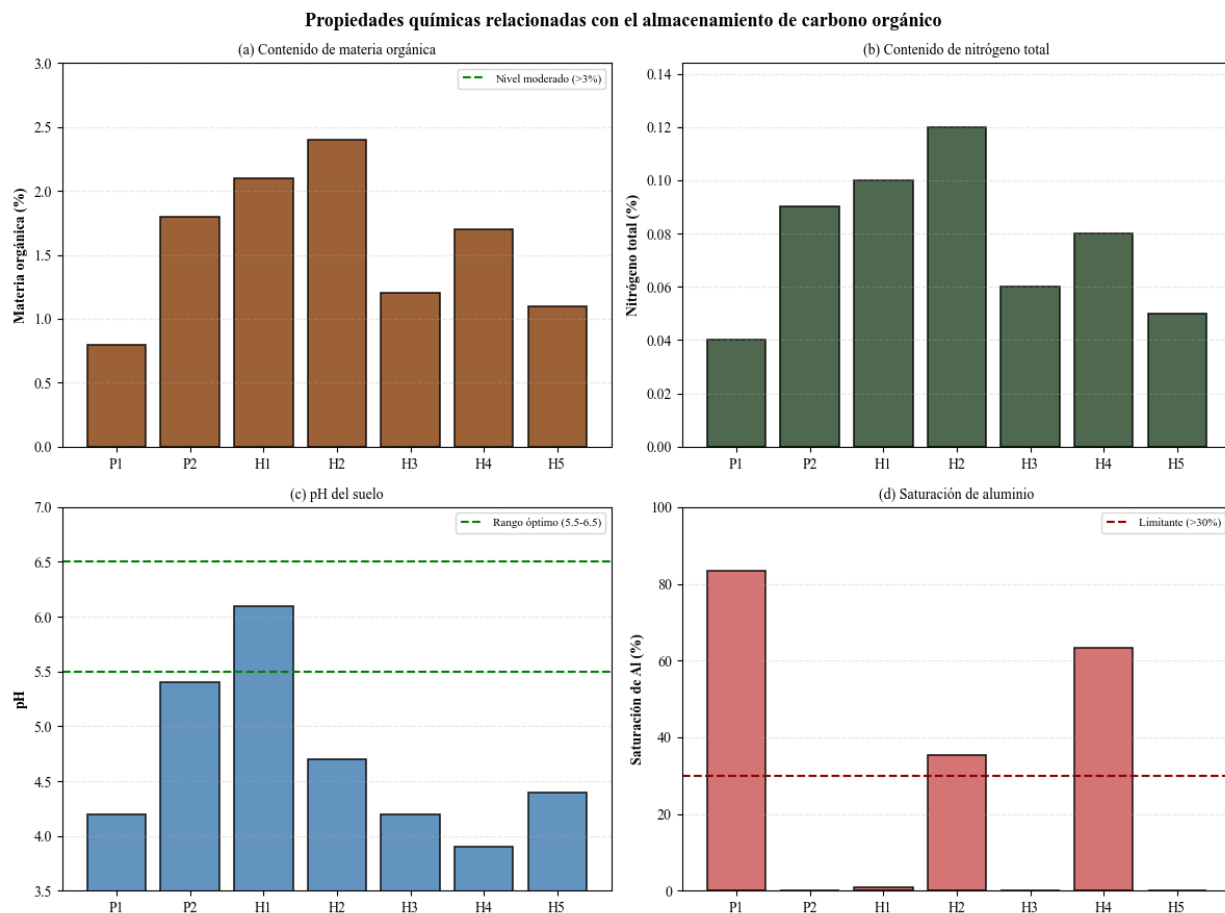
Parámetro	Unidad	P1	P2	H1	H2	H3	H4	H5
<i>pH</i>	-	4,2	5,4	6,1	4,7	4,2	3,9	4,4
<i>N total (Nt)</i>	%	0,04	0,09	0,1	0,12	0,06	0,08	0,05
<i>Materia orgánica (MO)</i>	%	0,8	1,8	2,1	2,4	1,2	1,7	1,1

Parámetro	Unidad	P1	P2	H1	H2	H3	H4	H5
<i>Fósforo (P)</i>	ppm	1,2	3,8	11,2	8,1	2,1	2,9	13,9
<i>Azufre (S)</i>	ppm	7,06	5,34	7,65	7,06	8,24	10,69	5,34
<i>Aluminio (Al)</i>	meq/100 g	2,8	0,1	0,05	1,05	2,85	3,6	1,4
<i>Potasio (K)</i>	meq/100 g	0,05	0,2	0,12	0,15	0,06	0,21	0,1
<i>Calcio (Ca)</i>	meq/100 g	0,37	4,25	1,75	0,62	0,87	1,75	0,62
<i>Magnesio (Mg)</i>	meq/100 g	0,12	0,25	3,25	1,12	0,12	0,12	0,12
<i>Sodio (Na)</i>	meq/100 g	0,02	0,02	0,1	0,04	0,02	0,01	0,02
<i>Bases totales (BT)</i>	meq/100 g	0,56	4,64	5,22	1,93	1,07	2,09	0,86
<i>Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)</i>	meq/100 g	3,36	4,74	5,27	2,98	3,92	5,69	2,26
<i>% Saturación de Al</i>	%	83,33	-	0,95	35,23	-	63,27	-
<i>Boro (B)</i>	ppm	0,02	0,67	0,47	3,95	0,39	0,02	0,02
<i>Cobre (Cu)</i>	ppm	0,2	1,95	3,85	0,16	0,75	0,4	1,4
<i>Manganeso (Mn)</i>	ppm	1,35	11,85	64,37	17,5	4,15	2,65	4,55
<i>Hierro (Fe)</i>	ppm	112,5	282,5	631,25	570,62	201,25	284,37	439,37
<i>Zinc (Zn)</i>	ppm	0,5	1,3	14,8	15,75	2,1	2	2,15

Nota: El laboratorio de suelos de la Universidad de los Llanos no reportó valores de saturación de aluminio para P2, H3 y H5. Los resultados completos del análisis fisicoquímico del suelo se presentan en el Anexo 1.

La Figura 7 presenta las propiedades químicas directamente relacionadas con el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo, incluyendo el contenido de materia orgánica, nitrógeno total, pH y saturación de aluminio.

Figura 7 *Propiedades químicas relacionadas con el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo del humedal El Charco-Oasis.*



Nota: (a) Contenido de materia orgánica, (b) Contenido de nitrógeno total, (c) pH del suelo, (d) Saturación de aluminio.

El contenido de materia orgánica varió entre 0,8 % (P1) y 2,4 % (H2) (Figura 7a). De acuerdo con los criterios generales de interpretación de fertilidad propuestos por Brady y Weil (2016), los contenidos observados corresponden a niveles bajos a moderados. Los puntos internos H1 y H2 presentaron los valores más elevados (2,1 % y 2,4 %, respectivamente), mientras que el punto de borde P1 registró el valor más bajo (0,8 %). El punto H5 presentó un contenido de materia orgánica de 1,1 %, valor relativamente bajo en comparación con otros sectores internos del humedal.

El nitrógeno total presentó valores entre 0,04 % (P1) y 0,12 % (H2) (Figura 7b). Los mayores contenidos se registraron en H2 y H1 (0,12 % y 0,10 %, respectivamente), mientras que

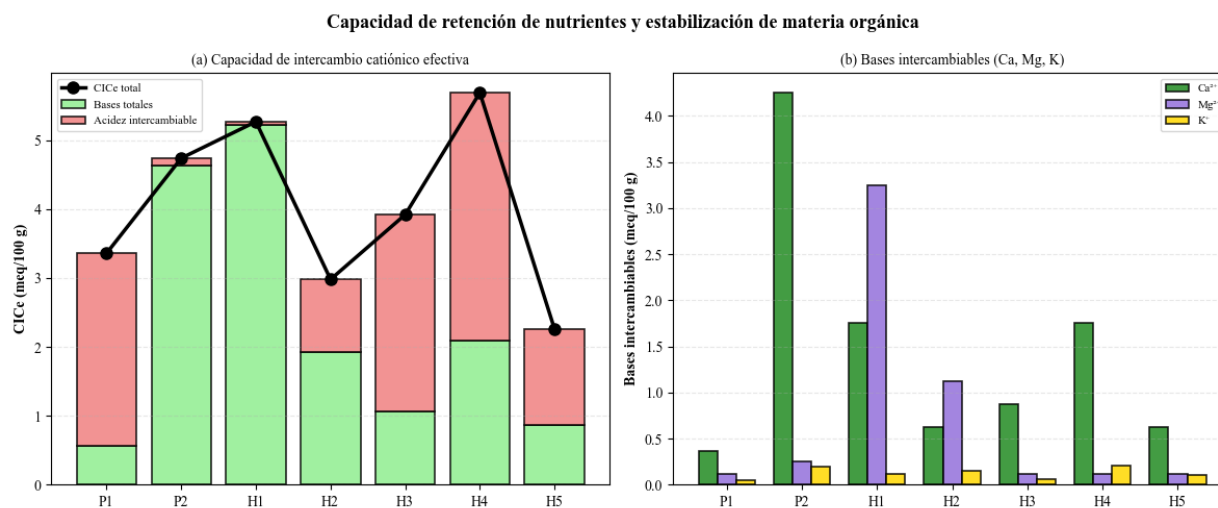
P1 y H5 presentaron los valores más bajos (0,04 % y 0,05 %). El nitrógeno total constituye un indicador importante de la fertilidad del suelo y suele presentar una estrecha relación con la acumulación y transformación de la materia orgánica (Reddy y DeLaune, 2008).

El pH varió entre 3,9 (H4) y 6,1 (H1), evidenciando condiciones predominantemente ácidas en el área de estudio (Figura 7c). El punto H1 presentó el valor menos ácido, mientras que H4 registró la mayor acidez. Los puntos de borde presentaron valores de 4,2 (P1) y 5,4 (P2). La acidez del suelo influye directamente sobre la disponibilidad de nutrientes y sobre diversos procesos biogeoquímicos asociados a la dinámica del suelo (Brady y Weil, 2016). Considerando que el rango óptimo para gran parte de la actividad microbiana del suelo se sitúa aproximadamente entre 5,5 y 6,5 (Havlin et al., 2014), únicamente H1 se ubicó dentro de este intervalo.

La saturación de aluminio presentó valores elevados en P1 (83,33 %), H2 (35,23 %) y H4 (63,27 %) (Figura 7d). De acuerdo con Havlin et al. (2014), porcentajes superiores al 30 % pueden representar condiciones restrictivas para el crecimiento vegetal y afectar diversos procesos edáficos. En contraste, H1 presentó una saturación de aluminio baja (0,95 %), coincidiendo con el valor de pH más cercano a la neutralidad. La interpretación de este parámetro se realizó únicamente para los puntos en los cuales el laboratorio reportó valores de saturación de aluminio.

Por otra parte, la Figura 8 presenta la capacidad de retención de nutrientes del suelo, representada por la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y las bases intercambiables.

Figura 8 Capacidad de retención de nutrientes y estabilización de materia orgánica en el suelo del humedal El Charco-Oasis.



Nota: (a) Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe), (b) Bases intercambiables (Ca, Mg, K).

La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) varió entre 2,26 meq/100 g (H5) y 5,69 meq/100 g (H4) (Figura 8a). Los valores más altos se registraron en H4, H1 y P2, mientras que H5 presentó la menor capacidad de intercambio catiónico efectiva. Este parámetro constituye un indicador de la capacidad del suelo para retener e intercambiar cationes nutrientes, propiedad estrechamente relacionada con el contenido de materia orgánica y con la presencia de minerales finos como las arcillas (Brady y Weil, 2017).

Desde la perspectiva del almacenamiento de carbono, la CICe adquiere especial relevancia debido a que favorece la formación y estabilización de asociaciones órgano-minerales. Estas interacciones contribuyen a proteger físicamente la materia orgánica frente a los procesos de descomposición microbiana, aumentando el tiempo de permanencia del carbono en el suelo (Six et al., 2002; Wiesmeier et al., 2019). En consecuencia, suelos con mayores valores de CICe suelen presentar una mayor capacidad para retener carbono orgánico bajo condiciones ambientales similares.

Las bases intercambiables también presentaron una marcada variabilidad espacial (Figura 8b). El calcio alcanzó su mayor concentración en P2 (4,25 meq/100 g), mientras que H1 registró el mayor contenido de magnesio (3,25 meq/100 g). El potasio presentó concentraciones relativamente bajas en todos los puntos evaluados, con valores entre 0,05 y 0,21 meq/100 g.

La importancia de estos cationes trasciende su función nutricional para las plantas. Diversas investigaciones han demostrado que elementos como el calcio y el magnesio participan en mecanismos de estabilización de la materia orgánica mediante la formación de puentes catiónicos entre compuestos orgánicos y superficies minerales, favoreciendo la formación de agregados estables y reduciendo la susceptibilidad del carbono orgánico a la mineralización (Six et al., 2002; Schlesinger y Bernhardt, 2013; Wiesmeier et al., 2019).

Particularmente, el calcio ha sido identificado como un elemento clave en la protección física y química del carbono orgánico del suelo, debido a su capacidad para promover la agregación y fortalecer las asociaciones órgano-minerales. En este sentido, las diferencias observadas en los contenidos de bases intercambiables entre los puntos de muestreo podrían influir en los mecanismos de estabilización del carbono presentes en el humedal, aspecto que posteriormente

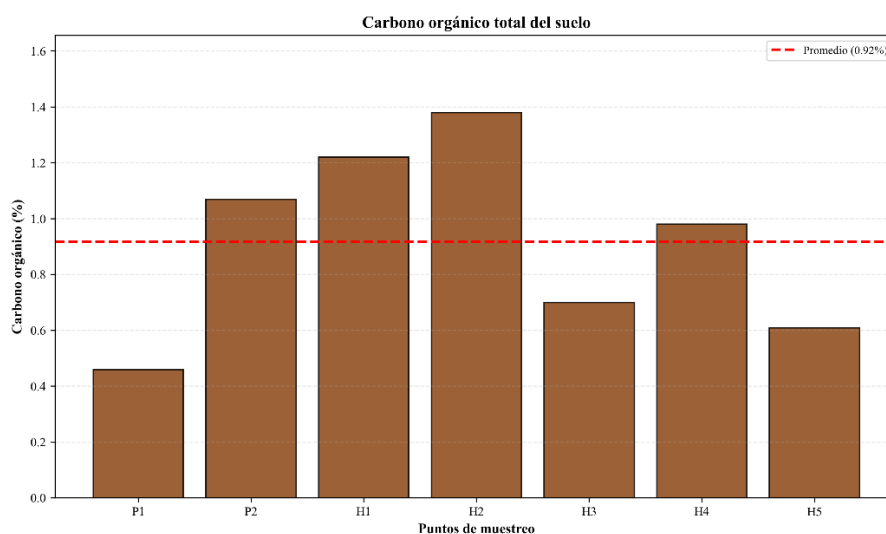
será contrastado mediante los análisis de correlación y componentes principales desarrollados en esta investigación.

5.2. Contenido de carbono orgánico del suelo

5.2.1 Carbono orgánico total en los puntos de muestreo

El contenido de carbono orgánico total (COT) determinado en los suelos del humedal El Charco-Oasis presentó variabilidad espacial entre los puntos de muestreo, evidenciando diferencias en las condiciones edáficas e hidrológicas que regulan los procesos de acumulación y estabilización del carbono en el suelo. Los resultados obtenidos para cada punto de muestreo se presentan en la Figura 9, mientras que el consolidado completo del estudio de suelos realizado se encuentra disponible en el Anexo 1.

Figura 9 Distribución del carbono orgánico total en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis.



Nota: El promedio se representa mediante la línea discontinua horizontal.

El contenido promedio de carbono orgánico total fue de 0,92 %. A partir de estos valores se calculó el coeficiente de variación (CV), obteniéndose un valor de 36,8 %, lo que indica una marcada heterogeneidad espacial del carbono orgánico dentro del humedal. Este comportamiento es frecuente en ecosistemas de humedal debido a la influencia simultánea de factores como la

dinámica hídrica, la textura del suelo, la disponibilidad de oxígeno, las características químicas y la cobertura vegetal, los cuales pueden variar significativamente incluso a escalas espaciales reducidas (Mitsch & Gosselink, 2015; Reddy & DeLaune, 2008).

Los mayores contenidos de carbono orgánico se registraron en los puntos H2, H1 y P2. Estos sectores presentaron características que favorecen el almacenamiento de carbono, entre ellas mayores contenidos de humedad, mayores contenidos de materia orgánica y condiciones químicas relativamente menos restrictivas. Particularmente, H2 registró simultáneamente el mayor contenido de materia orgánica (2,4 %), el mayor contenido de nitrógeno total (0,12 %) y uno de los mayores contenidos de humedad gravimétrica (30,68 %), condiciones que favorecen la incorporación y conservación de residuos orgánicos en el suelo (Six et al., 2002; Wiesmeier et al., 2019).

De manera similar, H1 presentó uno de los contenidos más elevados de carbono orgánico (1,22 %), acompañado por un pH de 6,1, valor cercano al rango considerado favorable para numerosos procesos biológicos del suelo. Asimismo, este punto presentó una humedad gravimétrica de 28,03 %, una textura franco arenosa y bajos niveles de saturación de aluminio, características que pueden favorecer una mayor acumulación de materia orgánica y carbono en comparación con otros sectores del humedal (Brady & Weil, 2017; Havlin et al., 2014).

Por su parte, P2 registró un contenido de carbono orgánico de 1,07 %, superior al promedio general del humedal. Este comportamiento podría estar asociado con su mayor contenido de arcilla (20 %), dado que las fracciones finas favorecen la formación de agregados y asociaciones órgano-minerales capaces de proteger físicamente la materia orgánica frente a la descomposición microbiana (Six et al., 2002; Wiesmeier et al., 2019).

Los menores contenidos de carbono orgánico fueron observados en P1, H5 y H3. En estos puntos se identificaron condiciones físicas y químicas potencialmente menos favorables para la acumulación de carbono. Particularmente, H5 presentó la textura más arenosa del estudio (74 % de arena), la mayor densidad aparente (1,636 g/cm³) y el menor contenido de humedad gravimétrica (19,32 %), características asociadas con una menor capacidad de retención de agua y una mayor aireación del suelo. Estas condiciones suelen favorecer la actividad microbiana aeróbica y acelerar la descomposición de la materia orgánica, reduciendo potencialmente la permanencia del carbono en el sistema (Lal, 2004; Brady & Weil, 2017).

En el caso de P1, el bajo contenido de carbono orgánico (0,46 %) coincidió con elevados niveles de saturación de aluminio (83,33 %), baja capacidad de intercambio catiónico efectiva (3,36 meq/100 g) y condiciones de fuerte acidez (pH 4,2). Estos factores pueden limitar el desarrollo de la vegetación y modificar la disponibilidad de nutrientes, reduciendo el aporte continuo de residuos orgánicos al suelo (Havlin et al., 2014). Por su parte, H3 presentó un contenido de carbono orgánico de 0,70 %, asociado a condiciones intermedias de humedad y fertilidad, lo que sugiere la influencia conjunta de múltiples factores edáficos sobre los procesos de acumulación de carbono.

Los resultados obtenidos indican que la distribución espacial del carbono orgánico en el humedal no depende exclusivamente de la ubicación de los puntos dentro o fuera del ecosistema, sino de la interacción conjunta entre propiedades físicas, químicas e hidrológicas del suelo. En consecuencia, la variabilidad observada respalda la necesidad de evaluar de manera integrada las propiedades edáficas para comprender los mecanismos que regulan el almacenamiento de carbono orgánico en este tipo de ecosistemas.

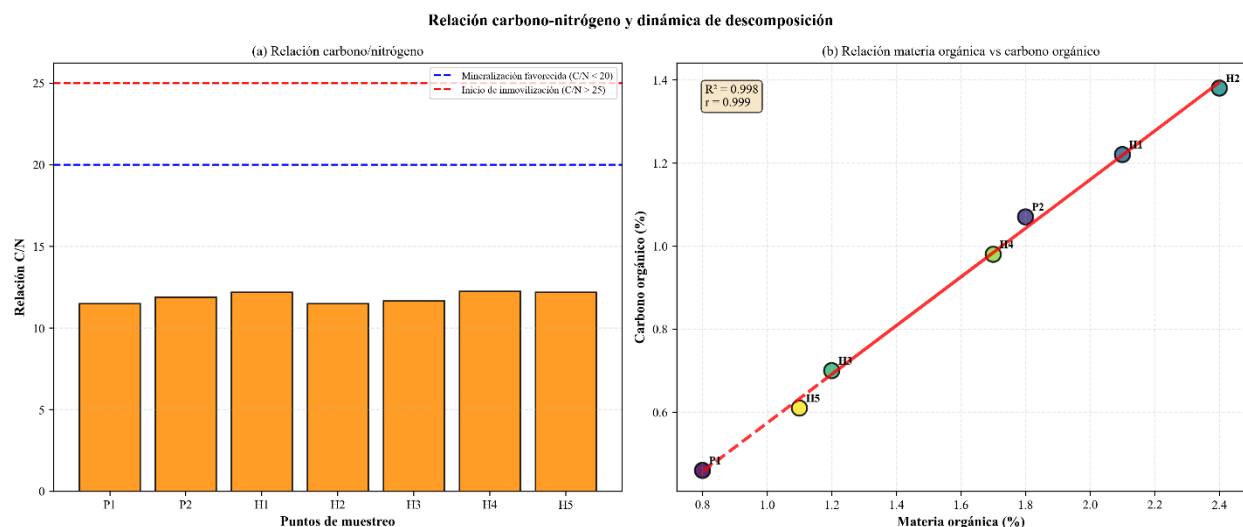
Los contenidos de carbono orgánico registrados evidencian la presencia de reservas moderadas de carbono en el suelo del humedal El Charco-Oasis. Aunque los valores observados son inferiores a los reportados para turberas y humedales altamente orgánicos, reflejan la capacidad del ecosistema para actuar como reservorio de carbono bajo las condiciones edáficas e hidrológicas actuales, resaltando la importancia de conservar los procesos ecológicos que favorecen su almacenamiento en el suelo (Page et al., 2011; Mitsch et al., 2013).

5.2.2 Relación carbono-nitrógeno y dinámica de descomposición

La relación carbono-nitrógeno (C/N) constituye uno de los indicadores más utilizados para evaluar la calidad de la materia orgánica del suelo y su susceptibilidad a los procesos de descomposición. Esta relación refleja el balance entre el carbono y el nitrógeno presentes en los residuos orgánicos y permite inferir el grado de transformación de la materia orgánica y la intensidad de los procesos biogeoquímicos asociados a su mineralización (Brady & Weil, 2017; Schlesinger & Bernhardt, 2013).

La Figura 10a presenta los valores de relación C/N calculados para los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis, mientras que la Figura 10b muestra la relación existente entre el contenido de materia orgánica y el carbono orgánico del suelo.

Figura 10 Relación carbono-nitrógeno y correlación entre materia orgánica y carbono orgánico en el suelo del humedal El Charco-Oasis.



Nota: (a) Relación C/N por punto de muestreo con líneas de referencia para mineralización favorecida ($C/N < 20$) e inicio de inmovilización ($C/N > 25$). (b) Correlación lineal entre materia orgánica y carbono orgánico ($R^2 = 0,998$).

Los valores de relación C/N oscilaron entre 11,5 y 12,2, evidenciando una baja variabilidad entre los puntos evaluados y un comportamiento relativamente homogéneo dentro del área de estudio. Todos los valores se ubicaron por debajo del umbral de $C/N = 20$ reportado en la literatura para sistemas donde predominan procesos de mineralización de la materia orgánica. De acuerdo con Brady y Weil (2017) y Schlesinger y Bernhardt (2013), relaciones C/N inferiores a 20 indican una composición de la materia orgánica favorable para los procesos de descomposición y transformación biológica.

Aunque estos resultados sugieren una dinámica activa de transformación de la materia orgánica, es importante señalar que en el presente estudio únicamente se determinó nitrógeno total. Por lo tanto, no es posible establecer directamente la disponibilidad de formas específicas de nitrógeno asimilables por los microorganismos, como amonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-). En consecuencia, la interpretación de la relación C/N debe entenderse como un indicador general de

la calidad de la materia orgánica y no como una medida directa de disponibilidad de nitrógeno para la actividad microbiana.

Por otra parte, la relación entre materia orgánica y carbono orgánico evidenció una asociación positiva muy fuerte ($r = 0,999$; $R^2 = 0,998$), indicando que ambas variables presentan un comportamiento prácticamente proporcional dentro del conjunto de datos analizado. Este resultado era esperado debido a que el carbono orgánico constituye uno de los principales componentes de la materia orgánica del suelo. En términos generales, la materia orgánica está conformada por una mezcla de compuestos carbonados derivados de residuos vegetales, microorganismos y sustancias húmicas en diferentes estados de transformación (Brady & Weil, 2017; Schlesinger & Bernhardt, 2013).

Los mayores contenidos de materia orgánica y carbono orgánico fueron registrados en H2 (2,4 % y 1,38 %, respectivamente), H1 (2,1 % y 1,22 %) y P2 (1,8 % y 1,07 %), mientras que P1 presentó los valores más bajos para ambas variables (0,8 % y 0,46 %). Esta correspondencia refuerza la consistencia interna de los resultados obtenidos durante los análisis físicoquímicos realizados en laboratorio.

La relativa uniformidad de las relaciones C/N observadas entre los puntos de muestreo sugiere que este indicador no constituye el principal factor responsable de la variabilidad espacial del carbono orgánico dentro del humedal. En contraste, los resultados obtenidos en las secciones anteriores indican que factores como la humedad del suelo, la textura, la densidad aparente, la acidez, la capacidad de intercambio catiónico efectiva y el contenido de materia orgánica podrían ejercer una influencia más importante sobre los procesos de acumulación y estabilización del carbono orgánico.

En este sentido, los puntos H2 y H1, que registraron los mayores contenidos de carbono orgánico (1,38 % y 1,22 %, respectivamente), también presentaron condiciones físicas y químicas relativamente más favorables, incluyendo mayores contenidos de humedad, menor densidad aparente, mayores contenidos de materia orgánica y menores restricciones químicas. Por el contrario, H5 y P1, que registraron los menores contenidos de carbono orgánico (0,61 % y 0,46 %), presentaron características asociadas a menor retención hídrica, mayor densidad aparente o mayores limitaciones químicas. Estos resultados evidencian que la distribución del carbono orgánico en el humedal responde a la interacción conjunta de múltiples factores edáficos e hidrológicos, más que a la relación C/N de manera aislada.

5.2.3 Reserva de carbono orgánico por unidad de área

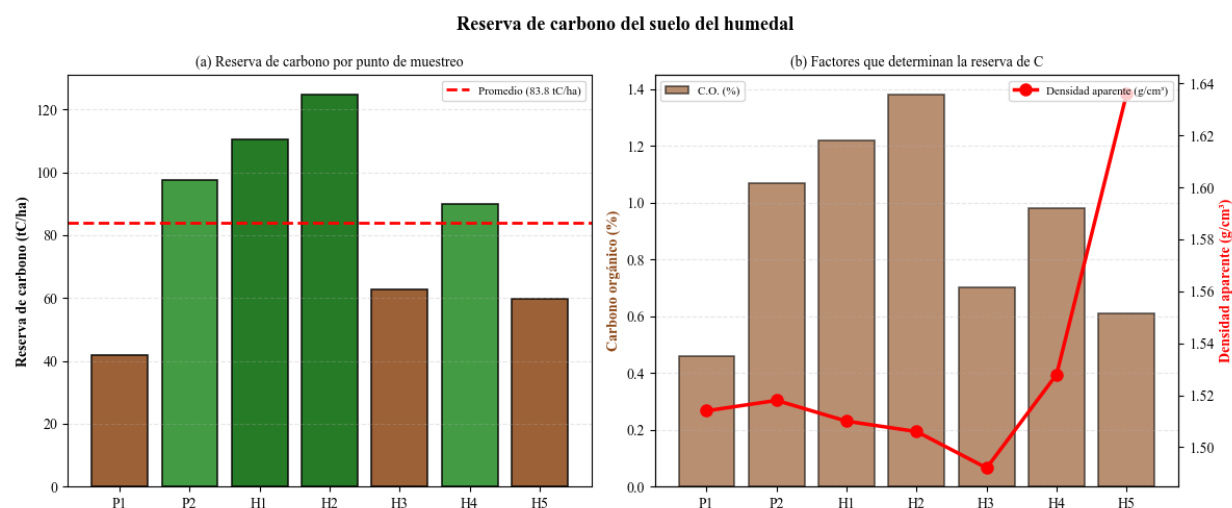
La reserva de carbono orgánico del suelo (RC) se calculó integrando el contenido de carbono orgánico total, la densidad aparente y la profundidad de muestreo (60 cm), siguiendo las directrices metodológicas propuestas por el IPCC (2006). Los valores obtenidos para cada punto de muestreo se presentan en la Tabla 5.

Tabla 4 Reserva de carbono orgánico por punto de muestreo del humedal El Charco-Oasis.

Parámetro	Unidad	P1	P2	H1	H2	H3	H4	H5
Reserva de Carbono	tC/ha	41,79	97,46	110,53	124,70	62,66	89,85	59,88

Por otro lado, la Figura 11 presenta la distribución de la reserva de carbono orgánico en los diferentes puntos de muestreo, así como la relación entre el contenido de carbono orgánico y la densidad aparente, variables empleadas para la estimación de las existencias de carbono en el suelo.

Figura 11 Reserva de carbono orgánico del suelo del humedal El Charco-Oasis.



Nota: (a) Barras verdes indican puntos que superan el promedio del humedal (83.8 tC/ha); barras cafés indican puntos por debajo del promedio. (b) Relación entre carbono orgánico (barras) y densidad aparente (línea roja) como factores determinantes de la reserva de carbono.

La reserva promedio de carbono orgánico estimada para el área de estudio fue de 83,8 t C/ha. Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad espacial, registrándose valores comprendidos entre 41,79 t C/ha y 124,70 t C/ha. Esta amplitud refleja diferencias en las condiciones físicas, químicas e hidrológicas previamente identificadas entre los puntos de muestreo.

El mayor valor de reserva fue registrado en el punto H2 (124,70 t C/ha), seguido por H1 (110,53 t C/ha), P2 (97,46 t C/ha) y H4 (89,85 t C/ha). Estos puntos también presentaron algunos de los mayores contenidos de carbono orgánico total observados durante el estudio, así como condiciones favorables para la conservación de materia orgánica. Particularmente, H2 combinó el mayor contenido de carbono orgánico total (1,38 %), el mayor contenido de materia orgánica (2,4 %) y uno de los mayores contenidos de humedad gravimétrica (30,68 %). Estas características favorecen la reducción de la velocidad de descomposición de los residuos orgánicos y promueven una mayor permanencia del carbono en el suelo, especialmente en ambientes con influencia hídrica periódica (Reddy & DeLaune, 2008; Mitsch et al., 2013).

De manera similar, H1 presentó una reserva elevada (110,53 t C/ha), asociada a un contenido de carbono orgánico de 1,22 %, un pH de 6,1 y una saturación de aluminio de apenas 0,95 %. Estas condiciones pueden favorecer el desarrollo de la cobertura vegetal y aumentar el aporte de residuos orgánicos al suelo, contribuyendo al almacenamiento de carbono (Havlin et al., 2014; Brady & Weil, 2017).

El punto P2 alcanzó una reserva de 97,46 t C/ha, resultado que podría estar relacionado con su contenido de arcilla (20 %) y con una capacidad de intercambio catiónico efectiva relativamente alta (4,74 meq/100 g). Diversos estudios han demostrado que las fracciones finas del suelo favorecen la formación de agregados y asociaciones órgano-minerales capaces de proteger físicamente la materia orgánica frente a la degradación microbiana, incrementando así su permanencia en el suelo (Six et al., 2002; Wiesmeier et al., 2019).

Por su parte, H4 presentó una reserva de 89,85 t C/ha a pesar de exhibir condiciones químicas restrictivas, como un pH fuertemente ácido (3,9) y una saturación de aluminio de 63,27 %. Este comportamiento podría estar relacionado con las condiciones de humedad observadas en campo y con la proximidad al cuerpo de agua principal del humedal, factores que favorecen la reducción de los procesos de oxidación de la materia orgánica y contribuyen a su conservación en el suelo (Reddy & DeLaune, 2008).

Las menores reservas fueron registradas en P1 (41,79 t C/ha), H5 (59,88 t C/ha) y H3 (62,66 t C/ha). En el caso de P1, este resultado coincide con el menor contenido de carbono orgánico total del estudio (0,46 %), una elevada saturación de aluminio (83,33 %), baja capacidad de intercambio catiónico efectiva y condiciones fuertemente ácidas (pH 4,2). Estas características pueden restringir la productividad vegetal y limitar los aportes de materia orgánica al suelo (Havlin et al., 2014).

En H5, la menor capacidad de almacenamiento observada puede asociarse a la combinación de una textura franco-arenosa con predominio de arena (74 %), el menor contenido de humedad gravimétrica (19,32 %) y la mayor densidad aparente registrada (1,636 g/cm³). De acuerdo con Håkansson y Lipiec (2000), valores elevados de densidad aparente suelen asociarse a procesos de compactación que modifican la estructura del suelo, reducen la porosidad y pueden afectar la dinámica de acumulación y estabilización de la materia orgánica. Adicionalmente, los suelos con alta proporción de arena presentan una menor capacidad para proteger físicamente el carbono orgánico frente a los procesos de descomposición (Six et al., 2002; Wiesmeier et al., 2019).

La relación entre el contenido de carbono orgánico y la densidad aparente presentada en la Figura 11b muestra que las mayores reservas de carbono se registraron en aquellos puntos donde coincidieron contenidos relativamente altos de carbono orgánico con densidades aparentes moderadas, como ocurrió en H2 y H1. En contraste, puntos con bajos contenidos de carbono orgánico, como P1 y H5, presentaron menores reservas aun cuando exhibieron diferencias en densidad aparente. Estos resultados sugieren que la variabilidad espacial observada en las reservas de carbono estuvo estrechamente asociada a las diferencias en el contenido de carbono orgánico total del suelo, mientras que la densidad aparente actuó como un factor complementario dentro del cálculo de las existencias de carbono.

La diferencia de 82,91 t C/ha entre el punto de mayor almacenamiento (H2) y el de menor almacenamiento (P1) evidencia una importante heterogeneidad espacial en la distribución del carbono dentro del humedal. Este comportamiento coincide con la alta variabilidad observada previamente para el carbono orgánico total (CV = 36,8 %) y refleja la influencia conjunta de factores físicos, químicos e hidrológicos sobre los procesos de acumulación y conservación del carbono en el suelo.

En términos generales, las mayores reservas de carbono se localizaron en sectores caracterizados por mayores contenidos de humedad, mayores concentraciones de carbono orgánico total y condiciones químicas relativamente más favorables, mientras que las menores reservas se asociaron principalmente a condiciones de mayor acidez, menor humedad y predominio de fracciones arenosas. Estos patrones coinciden con lo reportado para ecosistemas de humedal, donde la interacción entre la hidrología, las propiedades edáficas y la dinámica de la materia orgánica constituye uno de los principales controles sobre la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo (Reddy & DeLaune, 2008; Mitsch et al., 2013; Wiesmeier et al., 2019).

5.3. Factores que influyen en la distribución del carbono orgánico

5.3.1 *Análisis de correlación entre variables edáficas*

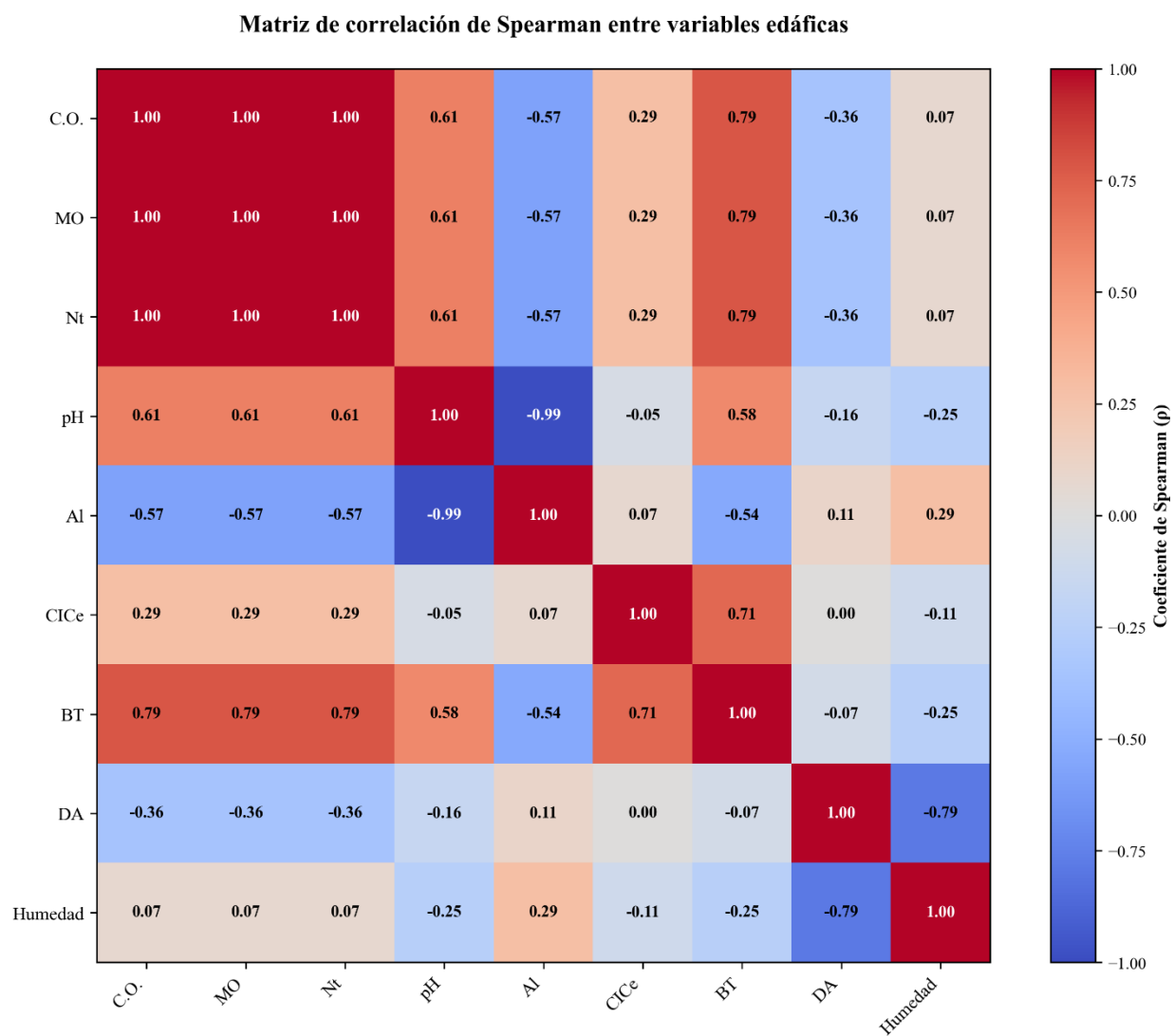
Previamente al análisis de correlación se evaluó la distribución de las variables mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Tabla 5). Los resultados mostraron que la densidad aparente y la humedad gravimétrica no presentaron distribución normal ($p < 0,05$), mientras que las demás variables sí cumplieron este supuesto. Considerando la presencia de variables no normales y el reducido tamaño muestral ($n = 7$), las asociaciones entre variables se evaluaron mediante el coeficiente de correlación de rangos de Spearman (ρ).

Tabla 5 Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las variables evaluadas.

Variable	p-value	Resultado
C.O	0,822	Normal
M.O	0,854	
Nt	0,897	
pH	0,251	
Al	0,382	
CICe	0,856	
BT	0,113	
DA	0,002	No normal
H	0,017	

La matriz de correlación de Spearman se presenta en la Figura 12. Los coeficientes obtenidos permitieron identificar las variables que mostraron mayor grado de asociación con el carbono orgánico del suelo y, por tanto, podrían estar relacionadas con los procesos de acumulación y estabilización de carbono dentro del humedal.

Figura 12 Matriz de correlación de Spearman entre variables edáficas del humedal El Charco-Oasis.



Nota: Los coeficientes de correlación se representan mediante gradiente de color: rojo intenso (correlación positiva fuerte), azul intenso (correlación negativa fuerte), blanco (sin correlación). C.O. = Carbono orgánico; M.O. = Materia orgánica; Nt = Nitrógeno total; Al = Aluminio; CICE = Capacidad de intercambio catiónico efectiva; BT = Bases totales; DA = Densidad aparente.

La asociación positiva más alta del carbono orgánico se observó con las bases totales ($\rho = 0,79$), seguida por el pH ($\rho = 0,61$). Estos resultados sugieren que los sitios con mejores condiciones de fertilidad química tendieron a presentar mayores contenidos de carbono orgánico. En particular, las bases intercambiables, principalmente calcio y magnesio, pueden contribuir a la formación de asociaciones órgano-minerales y a la estabilización de la materia orgánica en el suelo, reduciendo su susceptibilidad a la descomposición (Six et al., 2002; Wiesmeier et al., 2019).

El carbono orgánico presentó además una asociación negativa moderada con el aluminio intercambiable ($\rho = -0,57$). Este comportamiento coincide con lo observado en los puntos que registraron mayores niveles de saturación de aluminio, donde los contenidos de carbono tendieron a ser menores. La presencia de aluminio en formas intercambiables suele incrementarse bajo condiciones de elevada acidez y puede afectar el desarrollo vegetal y la dinámica de nutrientes del suelo (Havlin et al., 2014).

La relación entre pH y aluminio fue la más fuerte observada en la matriz ($\rho = -0,99$), evidenciando que los incrementos en la acidez estuvieron acompañados por mayores concentraciones de aluminio intercambiable. Este comportamiento es consistente con la química de suelos tropicales altamente meteorizados, donde la disminución del pH favorece la solubilización del aluminio presente en las fracciones minerales del suelo (Brady & Weil, 2017).

Por otra parte, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) presentó una asociación positiva baja con el carbono orgánico ($\rho = 0,29$). Aunque la CICE participa en los procesos de retención de nutrientes y estabilización de materia orgánica, los resultados sugieren que dentro del área evaluada su influencia fue menor que la observada para las bases intercambiables.

Dentro de las variables físicas evaluadas, la densidad aparente y la humedad gravimétrica presentaron asociaciones de baja magnitud con el carbono orgánico. La densidad aparente presentó una correlación negativa baja ($\rho = -0,36$), mientras que la humedad gravimétrica registró una asociación prácticamente nula ($\rho = 0,07$). Estos resultados indican que las diferencias observadas en el contenido de carbono orgánico entre los puntos de muestreo no estuvieron explicadas principalmente por las variaciones de humedad o compactación del suelo consideradas de manera individual.

No obstante, la fuerte asociación negativa observada entre densidad aparente y humedad gravimétrica ($\rho = -0,79$) evidencia que los suelos menos densos tendieron a retener mayores

cantidades de agua, comportamiento ampliamente reportado en estudios edáficos debido a la relación existente entre porosidad y almacenamiento hídrico (Hillel, 2004).

En conjunto, los resultados muestran que las asociaciones más importantes del carbono orgánico estuvieron relacionadas con variables químicas del suelo, particularmente las bases totales, el pH y el aluminio intercambiable. Esto sugiere que, dentro del humedal El Charco-Oasis, las condiciones químicas del suelo podrían desempeñar un papel más relevante que las propiedades físicas evaluadas en la distribución espacial del carbono orgánico.

5.3.2 Análisis de componentes principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) permitió sintetizar el comportamiento conjunto de las propiedades físicas y químicas del suelo evaluadas en el humedal El Charco-Oasis, facilitando la identificación de los principales gradientes edáficos presentes en el sistema. La información detallada correspondiente a la varianza explicada por cada componente principal y al gráfico de sedimentación (scree plot) se presenta en los Anexos 4 y 5, respectivamente.

Los resultados mostraron que los dos primeros componentes principales concentraron el 63,33 % de la variabilidad total de los datos, por lo que constituyen una representación adecuada de los principales patrones presentes en el conjunto de variables analizadas. Esta proporción de varianza explicada es comparable con la reportada en estudios edáficos y ambientales donde múltiples propiedades físicas y químicas interactúan simultáneamente y controlan procesos asociados al almacenamiento de carbono en el suelo (Jolliffe & Cadima, 2016; Legendre & Legendre, 2012).

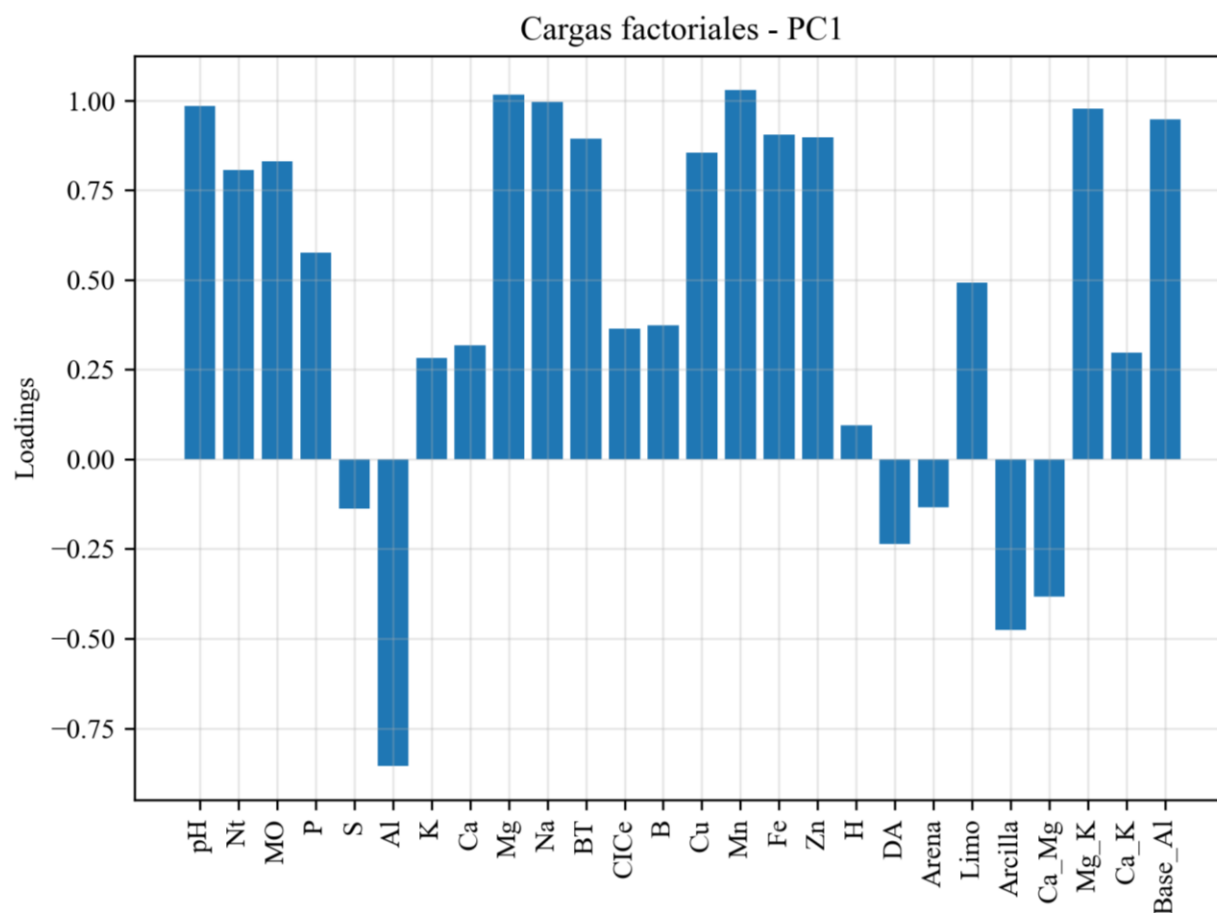
Las puntuaciones obtenidas para cada punto de muestreo en los componentes principales se presentan en la Tabla 6. Estas puntuaciones permiten visualizar la posición relativa de cada sitio dentro del espacio multivariado definido por los gradientes edáficos dominantes.

Tabla 6 *Puntuaciones (scores) de los puntos de muestreo en los seis primeros componentes principales del ACP.*

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
P1	-3,226	-0,044	1,175	1,940	-1,071	-1,117
P2	0,808	-2,650	-3,161	-1,748	-1,527	-0,189
H1	6,865	0,709	-0,748	1,802	0,586	-0,085
H2	1,990	-0,243	4,326	-1,877	-0,560	0,172
H3	-2,592	-1,014	-0,012	1,642	-0,451	1,377
H4	-2,094	-1,921	-0,198	-0,631	2,923	-0,249
H5	-1,750	5,163	-1,382	-1,128	0,099	0,091

La distribución de los puntos evidenció diferencias importantes en las condiciones edáficas del humedal. Particularmente, H1 se ubicó hacia el extremo positivo del primer componente principal, mientras que P1, H3 y H4 se localizaron en el extremo opuesto. Esta separación indica la existencia de contrastes marcados en las propiedades fisicoquímicas del suelo entre estos sectores del ecosistema. De manera similar, H5 presentó una posición diferenciada a lo largo del segundo componente principal, evidenciando condiciones particulares respecto al resto de los puntos evaluados.

La Figura 13 presenta las cargas factoriales asociadas al primer componente principal (PC1). Este eje estuvo dominado principalmente por variables relacionadas con la fertilidad química del suelo y el contenido de materia orgánica.

Figura 13 Cargas factoriales de las variables en el componente principal 1 (PC1) del ACP.

Nota: Base_Al corresponde a la relación entre bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na) y aluminio intercambiable, utilizada como indicador del equilibrio químico del suelo y del grado de acidez efectiva. Las variables Ca_Mg, Mg_K y Ca_K representan relaciones catiónicas entre cationes básicos, empleadas para evaluar el balance nutricional y la disponibilidad relativa de estos elementos en el suelo. En la nomenclatura utilizada, el símbolo () indica una relación entre variables (equivalente a “/”).

En el extremo positivo de PC1 se concentraron variables como materia orgánica (MO), nitrógeno total (Nt), bases totales (BT), pH, magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y la relación Base_Al. Por el contrario, el aluminio intercambiable (Al) presentó una contribución negativa importante dentro de este mismo eje.

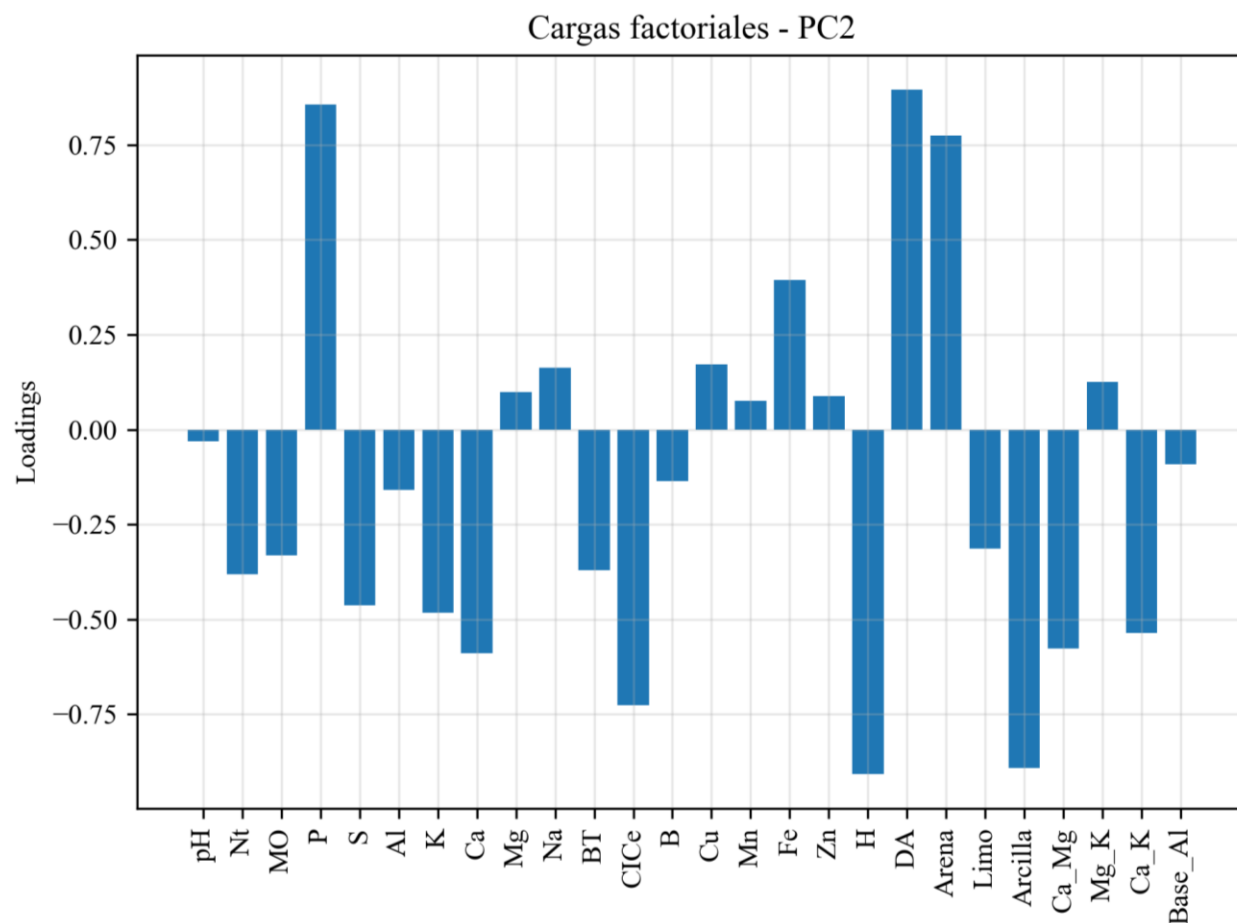
La disposición de estas variables indica que el principal gradiente de variación del humedal está asociado a cambios en la fertilidad química y en la calidad del suelo. Los sitios ubicados hacia

los valores positivos de PC1 corresponden a condiciones caracterizadas por mayores contenidos de materia orgánica, mayor disponibilidad de nutrientes y menor influencia de la acidez intercambiable. Estas características corresponden principalmente a los puntos H1, H2 y P2, los cuales registraron los mayores contenidos de carbono orgánico dentro del humedal.

Diversos estudios han demostrado que la materia orgánica constituye uno de los principales mecanismos de regulación de la fertilidad química del suelo, debido a su influencia sobre la retención de nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de elementos esenciales para la vegetación (Brady & Weil, 2017; Schlesinger & Bernhardt, 2013). Asimismo, la acumulación de carbono orgánico suele encontrarse estrechamente asociada a mayores contenidos de nitrógeno y bases intercambiables, debido a la incorporación continua de residuos vegetales y a la formación de complejos órgano-minerales relativamente estables (Six et al., 2002; Wiesmeier et al., 2019).

Por otra parte, la ubicación opuesta del aluminio dentro del componente principal refleja la influencia de la acidez sobre las propiedades del suelo. En ecosistemas tropicales altamente meteorizados, el incremento del aluminio intercambiable suele estar asociado con limitaciones para el crecimiento vegetal y una menor disponibilidad de nutrientes, condiciones que pueden reducir indirectamente el aporte de biomasa al suelo y afectar los procesos de acumulación de carbono orgánico (Havlin et al., 2014).

La Figura 14 presenta las cargas factoriales correspondientes al segundo componente principal (PC2).

Figura 14 Cargas factoriales de las variables en el componente principal 2 (PC2) del ACP.

Nota: Las variables Ca_Mg, Mg_K y Ca_K corresponden a relaciones catiónicas que permiten evaluar el equilibrio entre cationes básicos y su disponibilidad en el suelo. La variable Base_Al representa la relación entre bases intercambiables y aluminio intercambiable, asociada al grado de acidez y a posibles limitaciones químicas. El símbolo () indica relación entre variables (equivalente a “/”).

En este componente se observó una contribución positiva importante de la densidad aparente (DA) y del contenido de arena, mientras que la humedad gravimétrica, la arcilla, el calcio y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) presentaron contribuciones negativas relevantes.

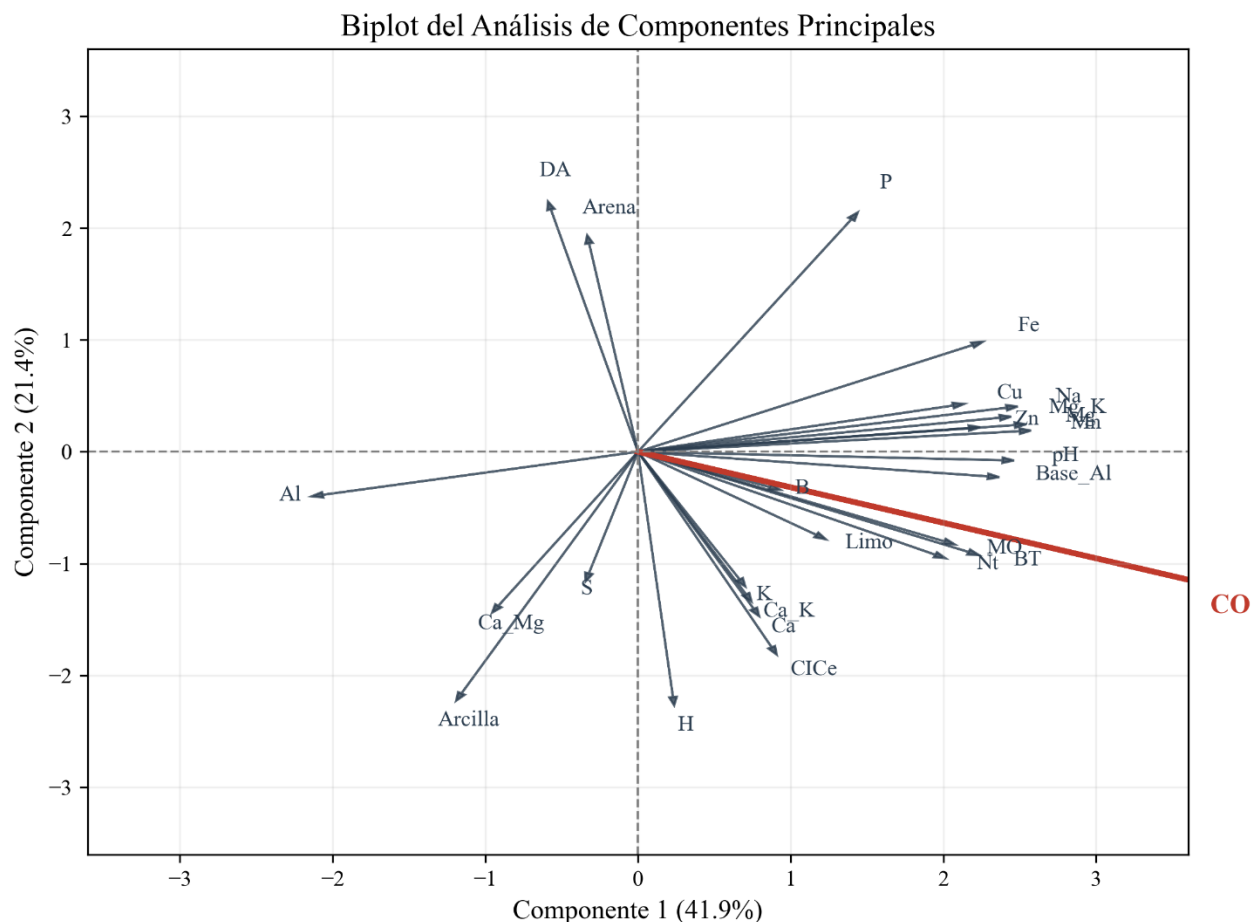
Este patrón evidencia un gradiente asociado principalmente a las condiciones físicas del suelo. Los valores positivos representan suelos con mayor densidad aparente y predominio de

fracciones gruesas, mientras que los valores negativos se relacionan con suelos más húmedos, con mayor proporción de partículas finas y una mayor capacidad de retención de nutrientes.

La influencia de estos atributos físicos sobre la dinámica del carbono ha sido ampliamente documentada. Los suelos con mayores contenidos de arcilla y limo presentan una mayor capacidad para proteger físicamente la materia orgánica frente a los procesos de descomposición, favoreciendo el almacenamiento de carbono a largo plazo. Por el contrario, los suelos con predominio de arena suelen presentar menor estabilidad estructural, menor capacidad de retención hídrica y una protección física más limitada de la materia orgánica (Lal, 2004; Six et al., 2002; Wiesmeier et al., 2019).

La integración de estos gradientes puede observarse con mayor claridad en el biplot presentado en la Figura 15, donde se representan simultáneamente las variables edáficas y los puntos de muestreo dentro del plano definido por los dos primeros componentes principales.

Figura 15 *Biplot del Análisis de Componentes Principales (PC1 vs PC2) para propiedades fisicoquímicas del suelo del humedal El Charco-Oasis.*



El biplot evidencia que el carbono orgánico (CO) se proyecta hacia el extremo positivo del componente principal 1 (PC1), compartiendo una orientación muy similar con la materia orgánica (MO), el nitrógeno total (Nt) y las bases totales (BT). Esta disposición indica que dichas variables contribuyen de manera conjunta al gradiente dominante representado por PC1, el cual concentra la mayor proporción de la variabilidad del sistema edáfico. Desde una perspectiva biogeoquímica, este patrón refleja la estrecha vinculación existente entre el carbono orgánico, la acumulación de materia orgánica y los procesos de ciclado de nutrientes en el suelo, especialmente aquellos relacionados con la dinámica del nitrógeno y la fertilidad química (Brady & Weil, 2017; Weil & Brady, 2017).

Particularmente, la proximidad direccional observada entre CO, MO y Nt resulta coherente con la naturaleza de la materia orgánica del suelo, donde el carbono constituye el principal

componente estructural y el nitrógeno forma parte de compuestos orgánicos derivados de residuos vegetales y actividad microbiana. En ecosistemas de humedal, la acumulación simultánea de estos elementos suele estar asociada a una mayor incorporación de biomasa y a tasas reducidas de descomposición, favoreciendo la conservación de carbono en el perfil edáfico (Reddy & DeLaune, 2008; Mitsch & Gosselink, 2015).

A su vez, variables químicas como pH, sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y la relación Base_Al se proyectan dentro del mismo sector general del espacio factorial ocupado por el carbono orgánico. Esta configuración sugiere que dichas propiedades participan en el gradiente representado por el componente principal 1, asociado a condiciones de mayor disponibilidad de bases intercambiables y menor restricción química para el desarrollo de la vegetación y de la actividad biológica del suelo. Estudios desarrollados en suelos tropicales han señalado que ambientes con menor acidez efectiva y mayor disponibilidad de cationes básicos favorecen la estabilización de la materia orgánica y la acumulación de carbono en el largo plazo (Six et al., 2002; Wiesmeier et al., 2019).

Bajo este escenario, la ubicación de la relación Base_Al dentro del mismo sector del carbono orgánico adquiere especial relevancia debido a que este indicador integra simultáneamente la disponibilidad de bases intercambiables y la presencia de aluminio intercambiable. Valores elevados de esta relación reflejan una menor influencia de la acidez efectiva sobre el sistema, condición que generalmente favorece el crecimiento vegetal, incrementa el aporte de residuos orgánicos al suelo y mejora las condiciones para la acumulación de carbono (Havlin et al., 2014).

En contraposición, el aluminio intercambiable (Al) se proyecta hacia el extremo negativo del componente principal 1, ocupando una posición opuesta a la observada para el carbono orgánico. Esta distribución evidencia que ambos parámetros contribuyen de manera diferencial al gradiente representado por PC1. La separación espacial observada resulta consistente con el comportamiento reportado para suelos tropicales altamente meteorizados, donde el incremento de la acidez y del aluminio intercambiable puede constituir una limitante para el desarrollo radical, la actividad microbiana y la incorporación de biomasa al suelo (Havlin et al., 2014; Quesada et al., 2010).

Desde otra perspectiva, el componente principal 2 (PC2) se encuentra representado principalmente por variables físicas e hidrológicas. En este eje destacan la densidad aparente (DA)

y el contenido de arena, cuyos vectores se orientan hacia el extremo positivo del componente, mientras que variables como humedad gravimétrica (H), arcilla y capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) se proyectan hacia el extremo opuesto. Esta disposición indica que dichas propiedades son las principales responsables de la variabilidad descrita por PC2 y representan un gradiente relacionado con la estructura física del suelo, la retención hídrica y la distribución de las fracciones texturales.

De esta manera, el segundo componente permite diferenciar condiciones edáficas asociadas a materiales más gruesos y compactados frente a condiciones caracterizadas por una mayor retención de agua y una mayor participación de fracciones finas. Diversos estudios han documentado que la textura y la estructura del suelo ejercen una influencia determinante sobre procesos como la infiltración, el almacenamiento de agua, la aireación y la protección física de la materia orgánica, factores que condicionan indirectamente la dinámica del carbono en ecosistemas terrestres y humedales (Lal, 2004; Six et al., 2002).

Cabe destacar que la humedad gravimétrica se orienta principalmente a lo largo del componente principal 2, lo que indica que su contribución se encuentra asociada fundamentalmente a la variabilidad física e hidrológica del sistema. Este comportamiento sugiere que las diferencias de humedad observadas entre los puntos de muestreo forman parte de un gradiente distinto al representado por el carbono orgánico dentro del plano factorial analizado. En ecosistemas de humedal, la humedad constituye un factor determinante para los procesos de oxidación y reducción del suelo; sin embargo, su influencia suele estar mediada por la interacción con otras propiedades físicas y químicas del sistema (Reddy & DeLaune, 2008).

Asimismo, las relaciones catiónicas (Ca_Mg, Mg_K y Ca_K) ocupan posiciones periféricas dentro del espacio multivariado y muestran orientaciones distintas a las observadas para el carbono orgánico. Esta distribución indica que dichas variables aportan información complementaria relacionada con el equilibrio nutricional entre cationes básicos, aunque su contribución a los gradientes dominantes representados por PC1 y PC2 es menor en comparación con las variables asociadas directamente a la materia orgánica, la fertilidad química y las condiciones físicas del suelo (Havlin et al., 2014).

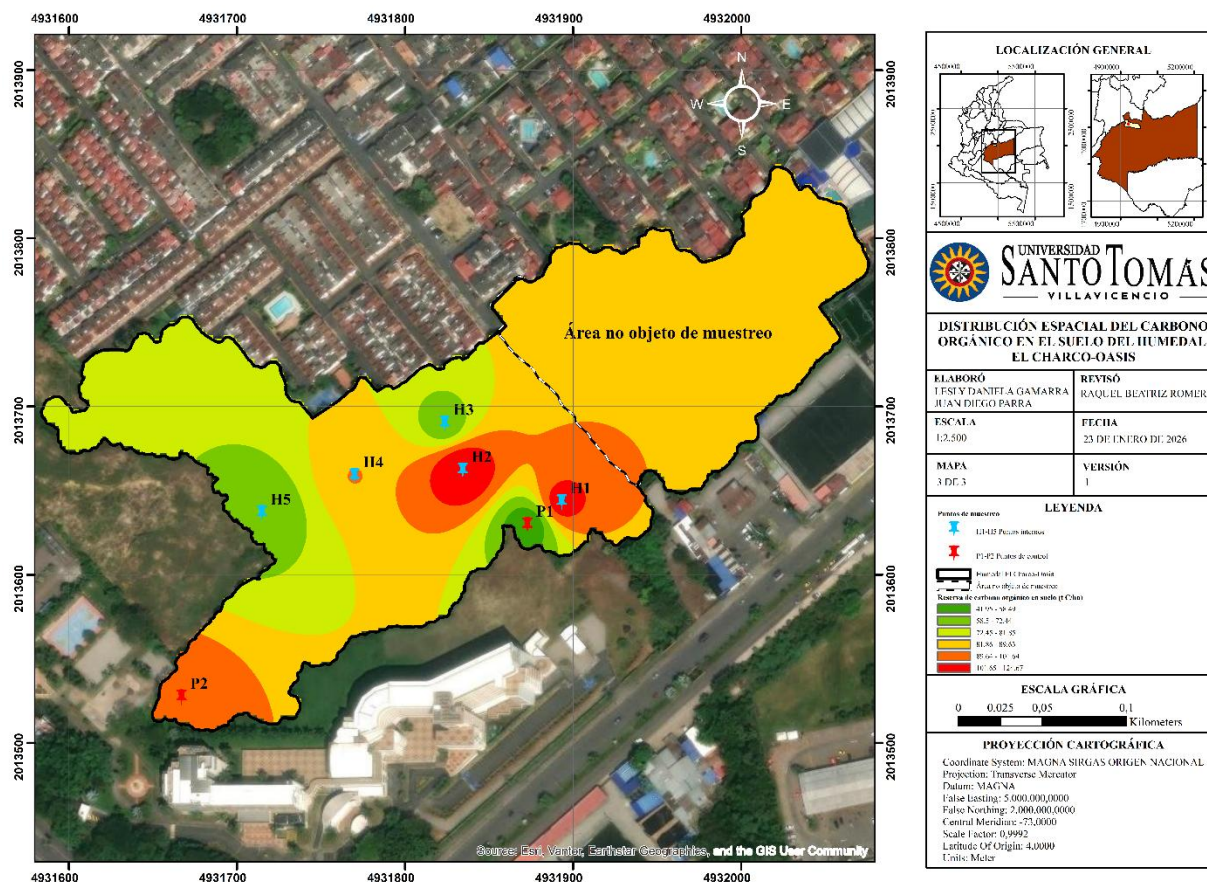
La configuración general del biplot sugiere que la variabilidad del carbono orgánico en el humedal El Charco-Oasis se encuentra principalmente representada dentro del gradiente definido por el componente principal 1 dominado por propiedades asociadas a la materia orgánica, el

nitrógeno total y las bases intercambiables, mientras que un segundo gradiente está relacionado con características físicas e hidrológicas del suelo. Esta diferenciación pone de manifiesto que la distribución espacial del carbono responde a la interacción simultánea de factores químicos y físicos, aunque las variables vinculadas a la fracción orgánica del suelo y a la fertilidad química representan los elementos más estrechamente asociados al patrón de variación observado en el sistema estudiado (Mitsch & Gosselink, 2015; Wiesmeier et al., 2019).

5.3.3 Distribución espacial del carbono orgánico

La Figura 16 presenta la distribución espacial de la reserva de carbono orgánico en el suelo del humedal El Charco-Oasis, obtenida mediante interpolación por el método de ponderación inversa de la distancia (IDW) a partir de los siete puntos de muestreo georreferenciados. Los valores estimados fueron agrupados en cinco clases de almacenamiento: 41,95-58,49 t C/ha (verde oscuro), 58,50-72,44 t C/ha (verde claro), 72,45-81,85 t C/ha (amarillo verdoso), 81,86-89,63 t C/ha (amarillo) y 89,64-101,64 t C/ha (naranja), además de la categoría más alta correspondiente a 101,65-124,67 t C/ha (rojo).

Figura 16 Distribución espacial de la reserva de carbono orgánico en el suelo del humedal El Charco-Oasis (t C/ha)



Es importante precisar que la superficie representada corresponde a una estimación espacial generada a partir de los puntos de muestreo mediante interpolación IDW. Por tanto, los patrones observados representan una aproximación de la distribución del carbono dentro del área evaluada y deben interpretarse considerando la ubicación y densidad de los puntos de muestreo.

La Figura 16 evidencia una distribución espacial heterogénea de la reserva de carbono orgánico dentro del humedal. Las mayores reservas se concentran en el sector central, representadas en color rojo (101,65-124,67 t C/ha), coincidiendo con los puntos H2 y H1, donde se registraron los valores más altos de almacenamiento de carbono. Alrededor de este núcleo se observa una franja de valores intermedios a altos representados en color naranja (89,64-101,64 t C/ha), que se extiende hacia sectores adyacentes del humedal.

Por otra parte, las menores reservas se localizaron principalmente en el sector occidental y en áreas cercanas al punto H5, representadas mediante tonalidades verde oscuro y verde claro.

Estas zonas coinciden con los menores valores de carbono registrados durante el muestreo y evidencian una reducción gradual del almacenamiento de carbono desde el núcleo central hacia las áreas periféricas del ecosistema.

Asimismo, el patrón espacial obtenido muestra que los sectores asociados a mayores reservas de carbono corresponden a los mismos puntos donde previamente se registraron condiciones edáficas favorables para la acumulación de materia orgánica, incluyendo mayores contenidos de humedad, menores niveles de acidez y una mayor disponibilidad de bases intercambiables. Esta tendencia resulta consistente con los resultados obtenidos en los análisis de correlación y componentes principales, donde las variables químicas asociadas a la fertilidad del suelo mostraron una mayor contribución a la variabilidad del carbono orgánico.

Desde una perspectiva ecológica, la concentración de las mayores reservas en la zona central del humedal es coherente con el comportamiento reportado para ecosistemas palustres y humedales tropicales, donde la permanencia de condiciones de saturación hídrica favorece la acumulación de materia orgánica y reduce las tasas de descomposición aeróbica, promoviendo la conservación del carbono en el suelo (Reddy & DeLaune, 2008; Mitsch & Gosselink, 2015).

En términos generales, la distribución espacial observada indica que el almacenamiento de carbono en el humedal El Charco-Oasis no es uniforme, sino que responde a la heterogeneidad de las condiciones edáficas presentes dentro del ecosistema. Las mayores reservas se concentran en sectores que reúnen condiciones más favorables para la acumulación y conservación de materia orgánica, mientras que las menores reservas se localizan en áreas donde dichas condiciones son menos evidentes.

5.4. Reserva total de carbono orgánico del humedal El Charco-Oasis

5.4.1 Estimación del stock de carbono orgánico en el suelo

La reserva de carbono orgánico del suelo se estimó a partir del valor promedio de almacenamiento obtenido en los puntos de muestreo (83,8 t C/ha) y del área efectivamente evaluada dentro del humedal, correspondiente a 4,078 ha. A partir de esta relación se estimó una reserva de 341,74 t C almacenadas en los primeros 60 cm de suelo del área estudiada.

Este valor equivale aproximadamente a 1.253,03 t CO₂, calculadas mediante el factor de conversión estequiométrico 44/12. La magnitud de la reserva estimada evidencia la importancia del suelo como principal reservorio de carbono dentro del ecosistema y confirma el papel de los humedales como ambientes con capacidad significativa para el almacenamiento de carbono orgánico (Mitsch & Gosselink, 2015; Leifeld & Menichetti, 2018).

Las diferencias observadas entre los puntos de muestreo indican una marcada variabilidad espacial en la capacidad de almacenamiento de carbono dentro del humedal. Los mayores valores se registraron en H2 (124,67 t C/ha) y H1 (110,53 t C/ha), mientras que las menores reservas correspondieron a P1 (41,95 t C/ha) y H5 (58,49 t C/ha). Estas diferencias coinciden con las variaciones observadas en propiedades edáficas como pH, contenido de humedad, textura, materia orgánica y disponibilidad de bases intercambiables.

De manera complementaria, si el valor promedio obtenido se extrapola a la totalidad del humedal delimitado mediante fotogrametría aérea (6,412 ha), se obtiene una reserva potencial de 537,57 t C, equivalente a 1.972,43 t CO₂. Sin embargo, esta estimación debe interpretarse con precaución debido a que una porción del área total no fue objeto de muestreo, por lo que la distribución espacial del carbono en dichos sectores no pudo ser verificada directamente. En consecuencia, la reserva calculada para el área efectivamente evaluada constituye la estimación más robusta derivada de los datos obtenidos en este estudio.

Los valores registrados se encuentran dentro de los rangos reportados para humedales tropicales y ecosistemas con condiciones favorables para la acumulación de materia orgánica, donde el almacenamiento de carbono está estrechamente condicionado por factores hidrológicos, edáficos y biológicos (Reddy & DeLaune, 2008; Page et al., 2011).

5.4.2 Aporte ecosistémico del humedal como sumidero de carbono

Los resultados obtenidos evidencian que el humedal El Charco–Oasis desempeña una función relevante como reservorio de carbono dentro de la matriz urbana de Villavicencio. En el área efectivamente evaluada (4,078 ha), el suelo almacenó una reserva estimada de 341,74 t C en los primeros 60 cm de profundidad, equivalente a 1.253,03 t CO₂. Esta capacidad de almacenamiento se encuentra asociada a la interacción entre las condiciones hidrológicas, las propiedades fisicoquímicas del suelo y la cobertura vegetal, factores que regulan los procesos de

incorporación, transformación y conservación de la materia orgánica en ecosistemas de humedal (Reddy & DeLaune, 2008; Mitsch & Gosselink, 2015).

Los humedales son reconocidos a nivel mundial por su contribución al almacenamiento de carbono debido a que las condiciones de saturación hídrica reducen la disponibilidad de oxígeno en el suelo y ralentizan los procesos de descomposición de la materia orgánica, favoreciendo su acumulación a lo largo del tiempo (Mitsch & Gosselink, 2015; Leifeld & Menichetti, 2018). Como resultado, estos ecosistemas pueden actuar como importantes reservorios de carbono, almacenando cantidades significativas tanto en la biomasa vegetal como en los horizontes superficiales y subsuperficiales del suelo (Page et al., 2011).

Al integrar la reserva de carbono edáfico estimada en esta investigación con la reserva de carbono en biomasa aérea y subterránea reportada por Cruz y Vásquez (2024), correspondiente a 16,11 t C para el humedal El Charco-Oasis, se obtiene un almacenamiento total aproximado de 357,85 t C, equivalente a 1.312,12 t CO₂. Esta distribución pone de manifiesto que el suelo constituye el principal reservorio de carbono del ecosistema, mientras que la biomasa representa una fracción complementaria dentro del balance total de carbono.

Asimismo, los resultados mostraron que los mayores contenidos de carbono se localizaron en los puntos H1 y H2, los cuales coincidieron con sectores que presentaron mayores contenidos de humedad, menor acidez y una cobertura vegetal más desarrollada. Durante las actividades de campo se observó una mayor acumulación superficial de hojarasca y residuos vegetales en estos sectores, condiciones que favorecen el ingreso continuo de carbono al suelo mediante la incorporación de materia orgánica. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en ecosistemas de humedal, donde la productividad vegetal constituye una de las principales fuentes de carbono para el sistema edáfico (Reddy & DeLaune, 2008; Mitsch & Gosselink, 2015).

De manera complementaria, la distribución espacial del carbono evidenció una marcada heterogeneidad dentro del humedal, asociada a diferencias locales en propiedades físicas y químicas del suelo. Esta variabilidad resalta la importancia de considerar la heterogeneidad ambiental en estudios de almacenamiento de carbono, ya que los procesos de acumulación y conservación pueden variar significativamente incluso dentro de un mismo ecosistema (Leifeld & Menichetti, 2018; Wiesmeier et al., 2019).

Como referencia contextual, la Universidad Santo Tomás Seccional Villavicencio reportó emisiones institucionales de 215,86 t CO₂ para el año 2020 y de 315,07 t CO₂ para el año 2023,

asociadas principalmente al consumo de energía eléctrica, transporte institucional y gestión de residuos (Universidad Santo Tomás, 2021; Universidad Santo Tomás, 2025). Aunque estas cifras corresponden a ejercicios de cuantificación desarrollados bajo metodologías diferentes y no son directamente comparables con las reservas de carbono almacenadas en el suelo, permiten dimensionar la magnitud del carbono actualmente retenido en el humedal y resaltan la importancia de estos ecosistemas como reservorios naturales dentro del entorno urbano.

Adicionalmente, el humedal aporta otros servicios ecosistémicos relevantes para la ciudad. Buitrago Amaya y López Muñoz (2021) reportaron que este ecosistema contribuye a la regulación microclimática local mediante la disminución de la temperatura del aire en las áreas circundantes. Esta función, sumada al almacenamiento de carbono, la regulación hídrica, la conservación de hábitat y el mantenimiento de la biodiversidad, evidencia la importancia ecológica del humedal El Charco-Oasis dentro del paisaje urbano de Villavicencio.

En virtud de los hallazgos obtenidos, la conservación del Humedal adquiere especial relevancia para el mantenimiento de los procesos ecológicos asociados al almacenamiento de carbono. Los sectores que presentaron mayores reservas, particularmente H1 y H2, constituyen áreas prioritarias para la protección del ecosistema, mientras que aquellos con menores contenidos de carbono representan oportunidades para futuras acciones de restauración orientadas al fortalecimiento de la cobertura vegetal y al mejoramiento de las condiciones edáficas que favorecen la acumulación de materia orgánica.

6. Impacto social y humanístico

Los resultados obtenidos permiten reconocer al humedal El Charco-Oasis como un ecosistema estratégico dentro del contexto urbano de Villavicencio, debido a su capacidad para almacenar carbono orgánico en el suelo y a los múltiples beneficios ambientales asociados a este proceso. La estimación de una reserva de 341,74 t C en el área efectivamente estudiada aporta información inédita sobre una función ecológica que, hasta el momento, no había sido cuantificada para este humedal. Desde esta perspectiva, la investigación amplía el conocimiento disponible sobre los ecosistemas urbanos de la ciudad y aporta evidencia científica para fortalecer su valoración ambiental y social.

Bajo esta misma línea, la información generada constituye un insumo técnico relevante para los procesos de planificación y gestión ambiental. La identificación de sectores con diferentes capacidades de almacenamiento de carbono permite orientar acciones de conservación, monitoreo y restauración hacia áreas específicas del humedal, favoreciendo una asignación más eficiente de recursos humanos, técnicos y financieros. Del mismo modo, los resultados pueden servir como soporte para la actualización de instrumentos de manejo ambiental y para la incorporación de criterios asociados a servicios ecosistémicos en procesos de ordenamiento territorial.

Desde una dimensión social, la investigación contribuye a visibilizar la importancia de los humedales urbanos como espacios que sostienen funciones ecológicas esenciales para el bienestar de la población. Más allá de su valor paisajístico, estos ecosistemas participan en procesos relacionados con la regulación hídrica, el mantenimiento de la biodiversidad, la moderación de condiciones microclimáticas y el almacenamiento de carbono, servicios que repercuten directamente en la calidad de vida de las comunidades que habitan su entorno (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Mitsch & Gosselink, 2015). En consecuencia, la divulgación de estos resultados puede fortalecer procesos de educación ambiental, apropiación social del conocimiento y sensibilización ciudadana frente a la necesidad de conservar los humedales presentes en el área urbana de Villavicencio.

En una escala más amplia, los hallazgos de esta investigación aportan elementos para comprender la relación existente entre la sociedad, el territorio y los servicios ecosistémicos que ofrecen los humedales urbanos. La cuantificación del carbono almacenado permite reconocer que los beneficios proporcionados por el humedal no se limitan a sus funciones ecológicas, sino que

también contribuyen a procesos asociados con la sostenibilidad urbana, la resiliencia ambiental y la adaptación frente al cambio climático. Este reconocimiento fortalece la valoración ambiental del humedal dentro de la estructura ecológica de Villavicencio y promueve una visión del territorio fundamentada en la conservación de los ecosistemas, el uso sostenible de los recursos naturales y la protección de los servicios ecosistémicos que sustentan el bienestar colectivo.

Aunado a lo anterior, los resultados obtenidos adquieren especial relevancia en un escenario de creciente transformación urbana, donde los humedales suelen estar expuestos a procesos de fragmentación, alteración hidrológica y cambios en la cobertura vegetal. La evidencia generada demuestra que sectores específicos del humedal concentran una proporción importante de las reservas de carbono identificadas, lo que proporciona criterios objetivos para priorizar acciones de protección y restauración ecológica. Esta información resulta particularmente valiosa para la toma de decisiones por parte de autoridades ambientales, instituciones educativas y actores sociales vinculados a la gestión del territorio.

De igual manera, la investigación aporta elementos técnicos que contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), mediante la conservación de infraestructura verde urbana; el ODS 13 (Acción por el clima), al fortalecer estrategias locales de mitigación y adaptación frente al cambio climático; y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), a través de la protección y el uso sostenible de los ecosistemas naturales.

Finalmente, la investigación establece una línea base que podrá ser utilizada en futuras evaluaciones relacionadas con dinámica del carbono, servicios ecosistémicos y restauración de humedales urbanos. De esta manera, el estudio no solo aporta conocimiento científico sobre el humedal El Charco-Oasis, sino que también genera herramientas útiles para la gestión ambiental, la educación, la participación ciudadana y la construcción de estrategias orientadas a la sostenibilidad territorial.

Conclusiones

La evaluación de las propiedades fisicoquímicas del suelo permitió establecer que el humedal El Charco-Oasis presenta una marcada heterogeneidad espacial en sus características edáficas, reflejada en diferencias de textura, humedad, densidad aparente, acidez y disponibilidad de nutrientes entre los puntos de muestreo. Estas variaciones evidencian la influencia simultánea de factores hidrológicos, edáficos y antrópicos sobre la dinámica del suelo, configurando condiciones contrastantes para la acumulación y conservación del carbono orgánico dentro del ecosistema.

La cuantificación del carbono orgánico evidenció contenidos comprendidos entre 0,46 % y 1,38 %, así como reservas entre 41,79 y 124,70 t C/ha en los primeros 60 cm de profundidad. A partir del valor promedio obtenido (83,8 t C/ha) se estimó una reserva de 341,74 toneladas de carbono para el área efectivamente estudiada (4,078 ha). Estos resultados confirman la capacidad del humedal para almacenar carbono en el componente edáfico y ponen de manifiesto la relevancia del suelo como principal reservorio de carbono dentro del ecosistema.

La distribución espacial del carbono orgánico presentó un patrón heterogéneo, caracterizado por mayores niveles de almacenamiento en la zona central del humedal y menores reservas hacia sectores periféricos. Los puntos H1 y H2 concentraron los valores más elevados de carbono orgánico y reserva de carbono, asociados a mayores contenidos de materia orgánica, nitrógeno total y humedad del suelo, así como a condiciones químicas menos restrictivas. Por el contrario, los puntos P1 y H5 registraron las menores reservas debido a la presencia de factores limitantes relacionados con la acidez, el aluminio intercambiable, la textura más arenosa y la menor retención hídrica.

El análisis de correlación de Spearman evidenció que las asociaciones más relevantes del carbono orgánico ocurrieron con variables vinculadas a la fertilidad química del suelo. Las bases totales y el pH presentaron asociaciones positivas, mientras que el aluminio intercambiable mostró una asociación negativa. Estos resultados sugieren que las condiciones químicas del suelo desempeñan un papel determinante en la distribución espacial del carbono orgánico dentro del humedal, al influir sobre la disponibilidad de nutrientes, el desarrollo de la cobertura vegetal y los procesos de incorporación de materia orgánica al suelo.

Desde una perspectiva multivariada, el Análisis de Componentes Principales permitió identificar los principales gradientes ambientales que estructuran la variabilidad edáfica del sistema. Los dos primeros componentes principales explicaron el 63,33 % de la variabilidad total, evidenciando que la distribución del carbono orgánico se encuentra estrechamente asociada a un gradiente de fertilidad química representado por la materia orgánica, el nitrógeno total, las bases intercambiables y el pH, mientras que un segundo gradiente estuvo relacionado con atributos físicos e hidrológicos del suelo. Estos resultados demuestran que la acumulación de carbono responde a la interacción de múltiples factores y no a la influencia aislada de una sola variable.

Bajo esta perspectiva, el estudio aporta información inédita sobre el almacenamiento de carbono orgánico en un humedal urbano de la Orinoquia colombiana y proporciona una línea base científica para futuras investigaciones relacionadas con dinámica del carbono, restauración ecológica y valoración de servicios ecosistémicos. Asimismo, contribuye a reducir los vacíos de información existentes sobre reservas de carbono en humedales urbanos de la región, fortaleciendo el conocimiento disponible para este tipo de ecosistemas.

De igual manera, los resultados constituyen un insumo técnico para los procesos de planificación ambiental, conservación y manejo del humedal El Charco-Oasis, fortaleciendo la toma de decisiones orientadas a la protección de sus servicios ecosistémicos. Su aplicación contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), 13 (Acción por el clima) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres), al generar información científica que respalda la conservación de humedales urbanos como ecosistemas estratégicos para la mitigación del cambio climático y la sostenibilidad territorial.

Recomendaciones

Para futuras investigaciones, se recomienda incrementar la representatividad espacial del muestreo en sectores del humedal no evaluados debido a dificultades de acceso. La inclusión de estas áreas permitiría reducir la incertidumbre de las estimaciones espaciales y obtener una caracterización más integral de la variabilidad edáfica del ecosistema.

Considerando la heterogeneidad observada en la distribución del carbono orgánico, resulta recomendable aumentar la densidad de puntos de muestreo y complementar los análisis espaciales mediante herramientas geoestadísticas que permitan caracterizar con mayor precisión los patrones de variación identificados.

Asimismo, resulta pertinente implementar un programa de monitoreo periódico en los puntos georreferenciados establecidos durante esta investigación, empleando metodologías estandarizadas que permitan realizar comparaciones temporales consistentes. Este seguimiento facilitaría la identificación temprana de procesos de degradación o recuperación asociados a cambios en el uso del suelo y la dinámica hidrológica del humedal.

En materia de investigación, se recomienda incorporar variables biológicas complementarias, tales como biomasa microbiana, actividad enzimática, respiración del suelo y caracterización detallada de la cobertura vegetal. La integración de estos parámetros permitiría profundizar en los procesos que regulan la acumulación y estabilización del carbono orgánico en humedales.

Desde el ámbito de la gestión ambiental, se recomienda priorizar medidas de conservación en los sectores que registraron las mayores reservas de carbono, particularmente aquellos representados por los puntos H1 y H2. Paralelamente, las zonas asociadas a P1 y H5 constituyen áreas prioritarias para la implementación de estrategias de restauración ecológica orientadas al mejoramiento de las condiciones edáficas, la recuperación de la cobertura vegetal y el fortalecimiento de la funcionalidad ecológica del ecosistema.

Finalmente, se recomienda incorporar la información generada como insumo técnico para los instrumentos de planificación y gestión ambiental aplicables al humedal El Charco–Oasis. La inclusión de criterios relacionados con almacenamiento de carbono y servicios ecosistémicos puede fortalecer las estrategias de conservación, restauración y adaptación al cambio climático desarrolladas para este ecosistema urbano.

Referencias bibliográficas

- Aponte, H., Corvacho, M. F., Lertora, G., & Ramírez, D. W. (2021). *Reserva de carbono en un humedal del desierto costero de Sudamérica*. Gayana. Botánica, 78(2), 184-190. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432021000200184>
- Benavides, J. C., Vitt, D. H., & Wieder, R. K. (2013). *The influence of climate change on recent peat accumulation patterns of Distichia muscoides cushion bogs in the high-elevation tropical Andes of Colombia*. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 118(4), 1627-1635. <https://doi.org/10.1002/2013JG002419>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 363-375). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Bolívar Gamboa, A., et al. (2021). *Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia como herramienta de gestión del territorio*. Ecosistemas, 30(1), 1–12. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2019>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson. https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition
- Bridgham, S. D., Megonigal, J. P., Keller, J. K., Bliss, N. B., & Trettin, C. (2006). *The carbon balance of North American wetlands*. Wetlands, 26(4), 889-916. https://www.researchgate.net/publication/227317573_The_Carbon_Balance_of_North_American_Wetlands
- Buitrago Amaya, J. S., & López Muñoz, S. K. (2021). *Aporte del humedal el Charco-Oasis a la regulación térmica por medio del análisis de variables microclimáticas y de cobertura en Villavicencio* [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional USTA. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/33889>
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of geographical information systems* (3rd ed.). Oxford University Press. https://www.researchgate.net/publication/284311665_Principles_of_Geographical_Information_Systems

- Chimner, R. A., Bourgeau-Chavez, L., Grelik, S., Hribljan, J. A., Planas Clarke, A. M., Polk, M. H., Lilleskov, E. A., & Fuentealba, B. (2019). *Mapping mountain peatlands and wet meadows using multi-date, multi-sensor remote sensing in the Cordillera Blanca, Peru*. *Wetlands*, 39(5), 1057-1067. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01134-1>
- Coral, E. M. (2022). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos del humedal Ramsar Laguna de la Cocha [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81882>
- Cruz Mosquera, N., & Vásquez Parra, H. S. (2024). *Evaluación del potencial como sumidero de carbono del humedal El Charco-Oasis en el municipio de Villavicencio, departamento del Meta* [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional USTA. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/54554>
- Fernández Lucero, A., Ríos Patrón, E., & López Barrera, F. (2016). *Caracterización de la acumulación de carbono en pequeños humedales andinos en la cuenca alta del río Barbas (Quindío, Colombia)*. *Caldasia*, 38(1), 129-145. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-52322016000100007
- Fernández Martínez, F. (2020). Model development to determine the soil organic carbon stock based on diffuse reflectance: Case Carimagua–Meta [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/358794482_Model_development_to_determine_the_soil_organic_carbon_stock_based_on_diffuse_reflectance_Case_Carimagua_-_Meta
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed.). FAO. <https://www.fao.org/3/a0541e/a0541e.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (Update 2015)*. FAO. <https://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Standard operating procedure for soil organic carbon: Walkley-Black method*. FAO. <https://www.fao.org/3/ca7471en/ca7471en.pdf>

- Gardner, W. H. (1986). Water content. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2.^a ed., pp. 493–544). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c21>
- Garzón Cadena, M. J. (2021). *Análisis del estado socio ambiental de los humedales en el perímetro urbano de la ciudad de Villavicencio - Meta* [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/47638>
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). *Particle-size analysis*. En J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods* (pp. 255-293). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>
- Grossman, R. B., & Reinsch, T. G. (2002). *Bulk density and linear extensibility*. En J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods* (pp. 201-228). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c9>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Cengage Learning.
- Hair, J. F., Sabol, M. (2025). *Overview of Multivariate Data Analysis*, An. https://www.researchgate.net/publication/392967329_Overview_of_Multivariate_Data_Analysis_An
- Håkansson, I., & Lipiec, J. (2000). *A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction*. Soil and Tillage Research, 53(2), 71-85. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1)
- Hansen, V. D., & Nestlerode, J. A. (2014). *Carbon sequestration in wetland soils of the northern Gulf of Mexico coastal region*. Wetlands Ecology and Management, 22(3), 289-303. <https://doi.org/10.1007/s11273-013-9330-6>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press.
- Hribljan, J. A., Suárez, E., Heckman, K. A., Lilleskov, E. A., & Chimner, R. A. (2016). *Peatland carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo*. Wetlands Ecology and Management, 24(2), 113-127. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9482-2>

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2017). NTC 6230. Calidad del suelo. Determinación del contenido de humedad en base seca (factor de corrección por humedad). Icontec.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2021). NTC 5403. Calidad del suelo. Determinación del carbono orgánico. Icontec.*
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2025). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero*. IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/inventario-nacional-y-departamental-de-gei>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2024). *Determinación de la densidad aparente del suelo por métodos terrón parafinado y/o cilindro (IN-AGR-PC01-04)*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90055-I](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90055-I)
- Jiménez, L. J., Ramón, P., Sarango, J., Burneo, J. I., & Gusmán-Montalván, E. (2025). *Long-term grazing exclusion enhances soil carbon and nitrogen stocks in tropical dry forests of southern Ecuador*. *Frontiers in Soil Science*, 5, 1617798. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1617798>
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). *Principal component analysis: A review and recent developments*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), Article 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Lal, R. (2004). *Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security*. *Science*, 304(5677), 1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lal, R. (2008). *Carbon sequestration*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 815-830. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>

- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O. W., & Dhillon, S. (1997). Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33(4), 159–193.
- Legendre, P., & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* (3rd ed.). Elsevier.
- Leifeld, J., & Menichetti, L. (2018). *The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies*. *Nature Communications*, 9(1), Article 1071. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>
- Li, J., & Heap, A. D. (2014). *Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review*. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Minasny, B., McBratney, A. B., Malone, B. P., & Wheeler, I. (2013). *Digital mapping of soil carbon*. *Advances in Agronomy*, 118, 1-47. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405942-9.00001-3>
- Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J., Jørgensen, S. E., & Brix, H. (2013). *Wetlands, carbon, and climate change*. *Landscape Ecology*, 28(4), 583-597. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (5th ed.). John Wiley & Sons. https://www.researchgate.net/publication/271643179_Wetlands_5th_edition
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons. https://www.researchgate.net/publication/362079778_Design_and_Analysis_of_Experiments_9th_Edition
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. En A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 539-579). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Nyman, J. A., DeLaune, R. D., Roberts, H. H., & Patrick, W. H., Jr. (1993). *Relationship between vegetation and soil formation in a rapidly submerging coastal marsh*. *Marine Ecology Progress Series*, 96, 269-279. <https://doi.org/10.3354/meps096269>
- Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2006). *Fundamentals of ecology* (5th ed.). Thomson Brooks/Cole.

- Orozco-Hueje, D., Barreto-Rojas, D. M., Trujillo González, J. M., Silva-Parra, A., Serrano-Gómez, M., Castillo-Monroy, E. F., & Torres-Mora, M. A. (2023). *Sumideros naturales de carbono: Un estudio de caso en morichales de la altillanura colombiana*. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 178-199. <https://doi.org/10.22490/21456453.5531>
- Page, S. E., Rieley, J. O., & Banks, C. J. (2011). *Global and regional importance of the tropical Peatland Carbon Pool*. *Global Change Biology*, 17(2), 798-818. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>
- Parrado Parrado, F. H., & Caro Jiménez, R. S. (2020). *Línea base de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por los desplazamientos regulares de la comunidad universitaria desde y hacia los campus de la USTA sede Villavicencio* [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional USTA. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/32028>
- Poppiel, R. R., et al. (2025). *Soil health in Latin America and the Caribbean*. *Communications Earth & Environment*, 6, 21. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02021-w>
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Schwarz, M., Patiño, S., Baker, T. R., Czimczik, C., ... & Paiva, R. (2010). *Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis*. *Biogeosciences*, 7(5), 1515–1541.
- Ramsar Convention Secretariat. (2018). *Global wetland outlook: State of the world's wetlands and their services to people*. Ramsar Convention Secretariat. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/gwo_e.pdf
- Reddy, K. R., & DeLaune, R. D. (2008). *Biogeochemistry of wetlands: Science and applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203491454>
- Sampieri, R. H., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). *Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions*. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry: An analysis of global change* (3rd ed.). Academic Press.

- https://www.researchgate.net/publication/282722563_Biogeochemistry_An_Analysis_of_Global_Change_Third_Edition
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). *An analysis of variance test for normality (complete samples)*. Biometrika, 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). *Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils*. Plant and Soil, 241(2), 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Thomas, G. W. (1996). *Soil pH and soil acidity*. En D. L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods (pp. 475-490). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
- Torres Basto, M. F. (2023). *Estimacion de la capacidad de captura de carbono de la especie Mimosa trianae Benth, en el Humedal el Charco oasis, a partir de la aplicación de ecuaciones alométricas para resaltar la importancia de conservación de los humedales urbanos* [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional USTA. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/52304>
- United States Department of Agriculture. (2014). *Soil survey field and laboratory methods manual* (Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0). USDA Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/SSIR51.pdf>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). *An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil Science, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H. J., & Kögel-Knabner, I. (2019). *Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales*. Geoderma, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis (5th ed.)*. Pearson Education.

Anexos

Anexo 1 Resultados e interpretación del análisis fisicoquímico del suelo del humedal El Charco-Oasis (Laboratorio de Suelos, Universidad de los Llanos).

Parámetro	Unidad	Método	P1	Val.	P2	Val.	H1	Val.	H2	Val.	H3	Val.	H4	Val.	H5	Val.
pH	—	Potenciometríco (1:1 suelo:agua)	4,2	Ext. ácido	5,4	Muy ácido	6,1	Liger. ácido	4,7	Muy ácido	4,2	Ext. ácido	3,9	Ext. ácido	4,4	Ext. ácido
N total (Nt)	%	Kjeldahl	0,04	Bajo	0,09	Bajo	0,1	Medio	0,12	Medio	0,06	Bajo	0,08	Bajo	0,05	Bajo
Materia orgánica	%	Walkley–Black	0,8	Bajo	1,8	Bajo	2,1	Medio	2,4	Medio	1,2	Bajo	1,7	Bajo	1,1	Bajo
Carbono orgánico	%	Walkley–Black	0,46	Bajo	1,07	Bajo	1,22	Medio	1,38	Medio	0,7	Bajo	0,98	Bajo	0,61	Bajo
Fósforo (P)	ppm	Bray II	1,2	Bajo	3,8	Bajo	11,2	Bajo	8,1	Bajo	2,1	Bajo	2,9	Bajo	13,9	Bajo
Azufre (S)	ppm	Fosfato monobásico de Ca	7,06	Bajo	5,34	Bajo	7,65	Bajo	7,06	Bajo	8,24	Bajo	10,69	Medio	5,34	Bajo
Aluminio (Al)	meq/100 g	KCl 1N	2,8	Alto	0,1	Bajo	0,05	Bajo	1,05	Medio	2,85	Alto	3,6	Alto	1,4	Medio
Potasio (K)	meq/100 g	AcNH ₄ pH 7	0,05	Bajo	0,2	Medio	0,12	Bajo	0,15	Bajo	0,06	Bajo	0,21	Medio	0,1	Bajo
Calcio (Ca)	meq/100 g	AcNH ₄ pH 7	0,37	Bajo	4,25	Medio	1,75	Bajo	0,62	Bajo	0,87	Bajo	1,75	Bajo	0,62	Bajo
Magnesio (Mg)	meq/100 g	AcNH ₄ pH 7	0,12	Bajo	0,25	Bajo	3,25	Alto	1,12	Medio	0,12	Bajo	0,12	Bajo	0,12	Bajo
Sodio (Na)	meq/100 g	AcNH ₄ pH 7	0,02	Norma 1	0,02	Norma 1	0,1	Normal	0,04	Norma 1	0,02	Norma 1	0,01	Normal	0,02	Normal
Bases totales	meq/100 g	AcNH ₄ pH 7	0,56	Muy bajo	4,64	Bajo	5,22	Medio	1,93	Bajo	1,07	Bajo	2,09	Bajo	0,86	Bajo

Parámetro	Unidad	Método	P1	Val.	P2	Val.	H1	Val.	H2	Val.	H3	Val.	H4	Val.	H5	Val.
CICe	meq/100 g	AcNH ₄ pH 7	3,36	Bajo	4,74	Bajo	5,27	Bajo	2,98	Bajo	3,92	Bajo	5,69	Bajo	2,26	Bajo
Boro (B)	ppm	HCl 0.05 M	0,02	Bajo	0,67	Alto	0,47	Medio	3,95	Alto	0,39	Medio	0,02	Bajo	0,02	Bajo
Cobre (Cu)	ppm	DTPA	0,2	Bajo	1,95	Medio	3,85	Alto	0,16	Bajo	0,75	Bajo	0,4	Bajo	1,4	Medio
Manganeso (Mn)	ppm	DTPA	1,35	Bajo	11,85	Alto	64,37	Alto	17,5	Alto	4,15	Medio	2,65	Bajo	4,55	Medio
Hierro (Fe)	ppm	DTPA	112,5	Alto	282,5	Alto	631,25	Alto	570,62	Alto	201,25	Alto	284,37	Alto	439,37	Alto
Zinc (Zn)	ppm	DTPA	0,5	Bajo	1,3	Bajo	14,8	Alto	15,75	Alto	2,1	Medio	2,00	Medio	2,15	Medio
Arena	%	Bouyoucos	52	—	56	—	60	—	48	—	60	—	58	—	74	—
Limo	%	Bouyoucos	30	—	24	—	30	—	38	—	20	—	26	—	18	—
Arcilla	%	Bouyoucos	18	—	20	—	10	—	14	—	20	—	16	—	8	—
Textura	—	Triángulo textural USDA	F.L	Franco limoso	F.Ar. A	Franco arcillo arenoso	F.A	Franco arcilloso	F	Franco	F.Ar. A	Franco arcillo arenoso	F.A	Franco arcilloso	F.A	Franco arcilloso

Anexo 2 Resultados de humedad gravimétrica del suelo medidos en laboratorio USTA en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis

Muestra	Recipiente vacío (g)	Suelo húmedo (g)	Suelo seco (g)	Humedad (%)
P1	2,4	100,1	78,1	29,0
P2	2,2	100,0	78,1	29,0
H1	2,0	100,4	78,5	28,0
H2	1,8	100,2	77,1	31,0
H3	1,9	100,2	76,5	32,0
H4	2,0	100,0	78,4	28,0
H5	2,4	100,0	84,2	19,3

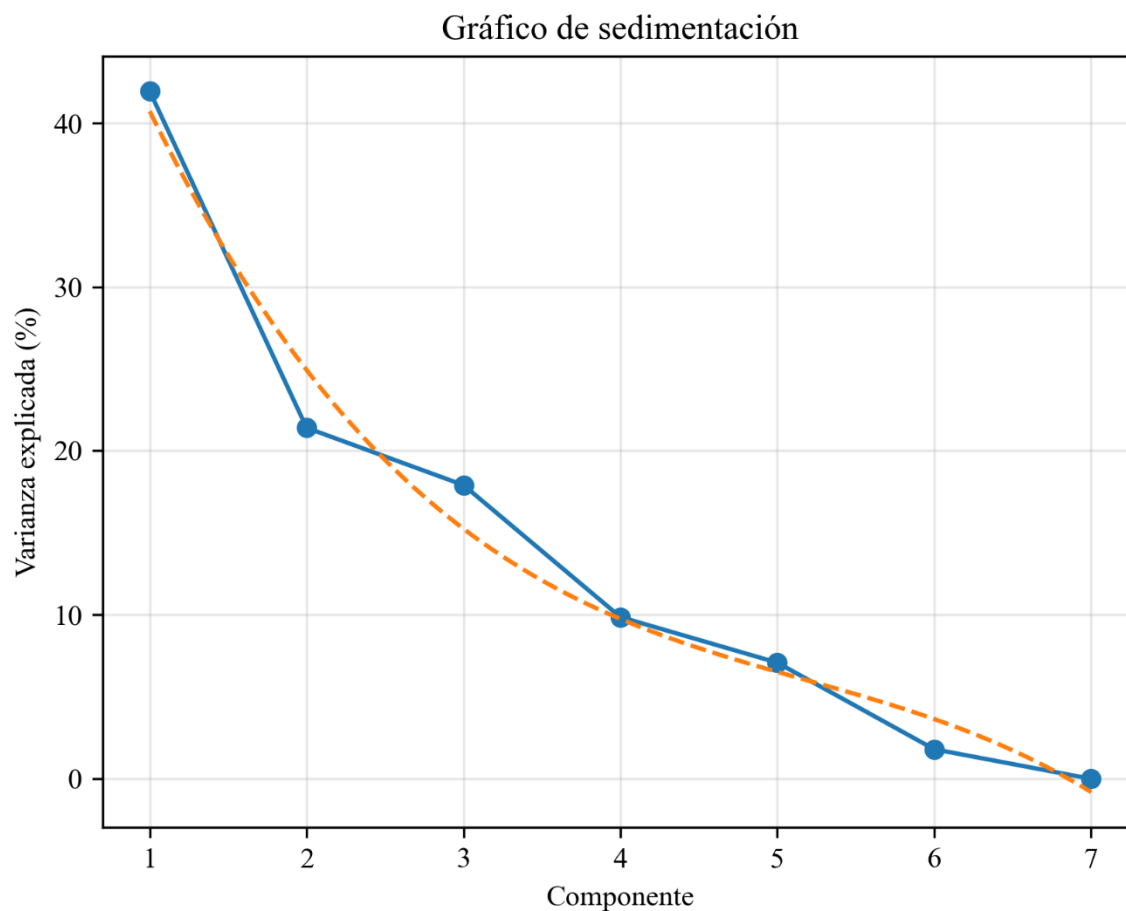
Anexo 3 Resultados de densidad aparente del suelo medidos en laboratorio USTA en los puntos de muestreo del humedal El Charco-Oasis

Muestra	Masa de suelo seco (g)	Densidad aparente (g/cm ³)
P1	75.7	1.514
P2	75.9	1.518
H1	75.5	1.51
H2	75.3	1.506
H3	74.6	1.492
H4	76.4	1.528
H5	81.8	1.636

Anexo 4 Varianza explicada por los componentes principales del ACP aplicado a propiedades fisicoquímicas del suelo del humedal El Charco-Oasis

PC	Eigenvalue	% Varianza	% Acumulado
1	12,718	41,929	41,929
2	6,492	21,402	63,331
3	5,433	17,912	81,243
4	2,993	9,867	91,110
5	2,149	7,084	98,194
6	0,548	1,806	100

Anexo 5 Gráfico de sedimentación (scree plot) del Análisis de Componentes Principales para propiedades fisicoquímicas del suelo del humedal El Charco-Oasis.



Anexo 6 Cargas factoriales (loadings) del análisis de componentes principales (ACP)

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
pH	0,985	-0,031	-0,322	0,047	-0,291	-0,065
Nt	0,806	-0,381	0,326	-0,483	0,098	0,150
MO	0,830	-0,332	0,294	-0,481	0,175	0,139
P	0,576	0,857	-0,059	-0,282	0,096	0,089
S	-0,137	-0,464	0,279	0,320	0,860	0,111
Al	-0,855	-0,160	0,263	0,310	0,494	0,032
K	0,281	-0,483	-0,238	-0,765	0,436	-0,148
Ca	0,318	-0,589	-0,736	-0,393	-0,130	-0,079
Mg	1,017	0,098	0,104	0,314	0,113	-0,025
Na	0,995	0,162	0,072	0,380	0,026	-0,007
BT	0,894	-0,370	-0,464	-0,099	0,000	-0,076
CICe	0,364	-0,726	-0,392	0,201	0,554	-0,077
B	0,373	-0,136	0,796	-0,521	-0,268	0,176
Cu	0,855	0,171	-0,591	0,237	-0,005	0,031
Mn	1,030	0,076	-0,052	0,302	0,080	-0,008

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Fe	0,904	0,394	0,229	-0,299	0,180	0,141
Zn	0,897	0,088	0,578	-0,069	0,045	0,117
H	0,095	-0,908	0,419	0,293	-0,172	0,206
DA	-0,236	0,896	-0,344	-0,391	0,150	-0,123
Arena	-0,133	0,775	-0,637	-0,007	0,254	0,279
Limo	0,492	-0,313	0,807	-0,075	-0,067	-0,406
Arcilla	-0,477	-0,891	-0,056	0,119	-0,343	0,100
Ca_Mg	-0,382	-0,576	-0,684	-0,426	0,198	0,008
Mg_K	0,978	0,126	0,074	0,422	0,104	-0,031
Ca_K	0,298	-0,536	-0,789	0,125	-0,318	0,227
Base_Al	0,947	-0,091	-0,426	0,261	-0,036	-0,105