ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y ESTRUCTURAL DEL SUELO BAJO INFLUENCIA DE HORMIGAS ARRIERAS EN EL HUMEDAL EL CHARCO-OASIS, CAMPUS AGUAS CLARAS, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, VILLAVICENCIO-META.

MANUEL MARQUEZ QUINGUEREJO

CC BY NC ND

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2026

ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y ESTRUCTURAL DEL SUELO BAJO INFLUENCIA DE HORMIGAS ARRIERAS EN EL HUMEDAL EL CHARCO-OASIS, CAMPUS AGUAS CLARAS, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, VILLAVICENCIO-META.

MANUEL MARQUEZ QUINGUEREJO

Documento final presentado como requisito para optar el titulo de Ingeniero Ambiental

Asesor
Mg. CINDY JOHANNA NIÑO CAMACHO
Magister en Ciencias Biológicas

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. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, 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

PhD. Raquel Beatriz ROMERO PUENTES
Decana de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Agradecimientos

Agradezco de manera especial a la profesora Cindy Johanna Niño Camacho, directora de grado, por su guía, liderazgo académico y dedicación en el desarrollo de esta tesis. De igual manera, extiendo mi agradecimiento al Dr. Daniel Eduardo Trujillo González por sus valiosos comentarios y recomendaciones.

Contenido

Pág.

Resumen 9
Abstract 12
Introducción 14
Justificación 16
Objetivos 18
Objetivos del macroproyecto 18
Objetivo General 18
Objetivos específicos 18
Objetivos de la auxiliatura 19
Objetivo General 19
Objetivos específicos 19
1. Descripción y análisis de las actividades realizadas 20
1.1 Reconocimiento del área de estudio 21
1.2 Toma de muestras en campo 22
1.3 Determinación del porcentaje de humedad gravimétrica 24
1.4 Determinación de la porosidad 26
1.5 Análisis de textura 29
1.6 Análisis de estabilidad de agregados 34
1.7 Análisis estadístico de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo 38
1.7.1 Selección de variables para el análisis estadístico 39
1.7.2 Análisis descriptivo de las variables fisicoquímicas del suelo 39
1.7.3 Fundamento de la prueba mann- whitney u 41
1.7.4 Asignación de rangos, cálculo de u y valor p exacto 42
2. Resultados estadísticos comparación entre puntos de muestreo (presencia de hormiga y sin presencia de hormiga) 44
2.1 Prueba estadística humedad gravimétrica (%) 44
2.2 Porosidad (%) 46

2.3 Estabilidad de agregados (%eaa) 47
2.4 Síntesis de la prueba exacta bilateral de mann- whitney u 50
2.5 Interpretación integrada 50
2.6 Alcance y limitaciones del análisis estadístico 51
2.7 Conclusiones prueba estadística 52
2.8 Comparación de los resultados con estudios previos 53
Conclusiones 56
Referencias 59
Anexos 64

Lista de tablas

Tabla 1 Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo del humedal El Charco - Oasis 21
Tabla 2 Resultados reportados de humedad gravimetrica 25
Tabla 3 Análisis de la densidad aparente, densidad de partículas y porosidad de las muestras de suelo del humedal el Charco-Oasis. 27
Tabla 4 Clasificación textural de las muestras de suelo mediante análisis manual 29
Tabla 5 Valores de DMP (Diámetro medio ponderado) y porcentaje de agregados estables en agua (%EAA) 36
Tabla 6 Valores individuales utilizados para el análisis estadístico 39
Tabla 7 Valores calculados de Media aritmética, desviación estándar, mediana y min-Max 40
Tabla 8 Valores promedio de humedad gravimétrica (%) por grupo experimental 44
Tabla 9 Ordenamiento de rangos de la humedad gravimétrica 45
Tabla 10 Valores promedio de porosidad (%) por grupo experimental 46
Tabla 11 Ordenamiento y rangos de la porosidad total 47
Tabla 12 Valores promedio de estabilidad de agregados (%) por grupo experimental 48
Tabla 13 Ordenamiento y rangos del porcentaje de agregados estables al agua 48
Tabla 14 Resultados inferenciales por variable 50

Lista de figuras

Figura 1 Mapa de localización de los puntos de muestreo establecidos en el humedal El Charco–Oasis..... 21
Figura 2 Reconocimiento del terreno presencia y ausencia de Hormiga Arriera 22
Figura 3 Extracción de muestra con barreno 23
Figura 4 Almacenamientos de muestra de suelo 24
Figura 5 Pesaje de la muestra después del secado de las muestras de suelo del humedal el Charco-Oasis..... 26
Figura 6 Secado al aire libre de las muestras de suelo puntos de muestreo tomadas en el humedal Oasis..... 34
Figura 7 Método “Lavado” de los agregados de las muestras del humedal El charco-Oasis..... 35
Figura 8 Porcentaje de agregados estables al agua (%EAA) en las muestras de suelo evaluadas en el humedal El Charco–Oasis. 37
Figura 9 Humedad gravimétrica promedio y desviación estándar en los grupos experimental y control del humedal El Charco–Oasis..... 44
Figura 10 Porosidad total promedio y desviación estándar de grupos con presencia de hormigas y de control. 46
Figura 11 Porcentaje promedio de agregados estables al agua (%EAA) y desviación estándar de los grupos control y con presencia de hormiga..... 48
Figura 12 Comparación de las propiedades físicas del suelo entre zonas control y zonas con hormigas arrieras..... 53

Lista de ecuaciones

Ecuación 1 Humedad gravimétrica 25
Ecuación 2 Densidad aparente 27
Ecuación 3 Porosidad 27
Ecuación 4 Dada la ecuación de Agregados estables al agua: 36
Ecuación 5 diámetro medio ponderado (DMP 36
Ecuación 6 Media aritmética ($\bar{x}$) para cada variable: 40
Ecuación 7 la desviación estándar (s) para cada variable: 40
Ecuación 8 Estadístico U de Mann–Whitney para el grupo control Mann y Whitney (1947) y Fay y Proschan (2010). 42
Ecuación 9 42
Ecuación 10 42
Ecuación 11 Valor P exacto bilateral por permutaciones Ernst (2004) y Fay y Proschan (2010) 43
Ecuación 12 Delta de Cliff 43

Resumen

El presente estudio se desarrolló como una auxiliatura de investigación en el marco del macroproyecto *"Relación hormigas arrieras y servicios ecosistémicos del suelo en el humedal El Charco-Oasis, Villavicencio, Meta"*. Esta auxiliatura se articuló específicamente con el objetivo del macroproyecto orientado a *"determinar la relación entre la presencia de las hormigas arrieras cortadoras de hojas y la dinámica de los microorganismos edáficos, así como su vínculo con los servicios ecosistémicos asociados al suelo del humedal El Charco Oasis, campus Aguas Claras, Universidad Santo Tomás, Villavicencio-Meta"*. No obstante, el alcance de la auxiliatura no comprendió el desarrollo integral de dicho objetivo en todos sus componentes biológicos, microbiológicos y socioambientales, sino que aportó al análisis del componente físico, estructural e hidrológico del suelo como base complementaria para su comprensión. En este sentido, el trabajo se orientó a evaluar variables como humedad gravimétrica, densidad aparente, porosidad, textura y estabilidad de agregados en puntos con y sin presencia visible de hormigas arrieras, con el fin de identificar posibles variaciones locales asociadas a su actividad bioturbadora. Por tanto, los resultados obtenidos deben interpretarse como una aproximación exploratoria que contribuye al entendimiento de las condiciones físicas del suelo relacionadas con la presencia de hormigas, y como un insumo técnico complementario para el desarrollo del macroproyecto y para futuras investigaciones sobre la dinámica edáfica, los servicios ecosistémicos y la conservación del humedal El Charco-Oasis.

Mediante el muestreo y el análisis de suelos en zonas con y sin presencia de la Hormiga Arriera se evaluaron variables como la humedad gravimétrica, la porosidad, la textura, y la estabilidad estructural del suelo, a través del porcentaje de agregados estables al agua y el diámetro medio ponderado. Estos indicadores permiten explorar posibles variaciones en la estructura y condición física del suelo asociadas a la actividad de excavación y redistribución de partículas que generan las hormigas arrieras.

Los resultados obtenidos en los siete puntos de observación evidenciaron diferencias descriptivas entre los grupos. La humedad gravimétrica presento medidas de 30.90% en control y 27.72% en los puntos de hormigas, mientras la porosidad fue de 42.83% de control y 42.19% para hormigas, Para %EAA se registraron medias de 6,17 % en el control y 9,88 % en los puntos con hormigas, siendo esta la diferencia descriptiva más marcada. No obstante, la prueba exacta

bilateral de Mann- Whitney no evidencio diferencias estadísticamente significativas para ninguna de las variables evaluadas ($p > 0,05$). La mayor dispersión registrada en los puntos con hormigas, particularmente en humedad y porosidad, evidencia una mayor variabilidad espacial, cuyos patrones pueden estar asociados a la dinámica local del suelo; sin embargo, debido al tamaño y desbalance de la muestra, estos resultados se consideran de carácter exploratorio y no permiten establecer relaciones

En este sentido, el estudio también proporciona información con la que discuten el papel de la posible bioturbación en la dinámica de los humedales urbanos, ya que genera eco de que la actividad de las hormigas arrieras pueda estar asociada a los cambios de una escala más local en la organización física del suelo. También se plantea que el estudio de estas interacciones biológicas y su conexión con los procesos hidro-ecológicos del ecosistema deben ser abordados con otros enfoques experimentales o diseños más completos.

De esta forma, el trabajo ayuda a mejorar la comprensión del suelo como un sistema dinámico en el que intervienen componentes bióticos y abióticos, generando una primera aproximación de cara a futuras investigaciones en un contexto de manejo, conservación y restauración de humedales urbanos.

Abstract

This study was conducted as a research assistantship within the framework of the macro-project “Relationship between leafcutter ants and soil ecosystem services in the El Charco-Oasis wetland, Villavicencio, Meta.” This assistantship was specifically aligned with the macro-project's objective of “determining the relationship between the presence of leafcutter ants and the dynamics of soil microorganisms, as well as their connection to the ecosystem services associated with the soil of the El Charco Oasis wetland, Aguas Claras campus, Santo Tomás University, Villavicencio-Meta.” However, the scope of the assistantship did not encompass the comprehensive development of this objective in all its biological, microbiological, and socio-environmental components, but rather contributed to the analysis of the physical, structural, and hydrological components of the soil as a complementary basis for its understanding. In this regard, the study focused on evaluating variables such as gravimetric moisture, bulk density, porosity, texture, and aggregate stability at sites with and without visible leafcutter ants, in order to identify possible local variations associated with their bioturbation activity. Therefore, the results obtained should be interpreted as an exploratory approach that contributes to understanding the physical soil conditions related to the presence of ants, and as a complementary technical input for the development of the macro-project and for future research on soil dynamics, ecosystem services, and the conservation of the El Charco-Oasis wetland.

Through soil sampling and analysis in areas with and without leafcutter ants, variables such as gravimetric moisture, porosity, texture, and soil structural stability were evaluated, measured by the percentage of water-stable aggregates and the weighted average diameter. These indicators allow us to explore possible variations in soil structure and physical condition associated with the burrowing and particle redistribution activity generated by leafcutter ants.

The results obtained at the seven observation points showed descriptive differences between the groups. Gravimetric moisture content measured 30.90% in the control group and 27.72% in the ant-infested areas, while porosity was 42.83% in the control group and 42.19% in the ant-infested areas. Averages of 6.17% were recorded in the control group and 9.88% in the ant-infested areas, this being the most marked descriptive difference. However, the two-tailed Mann-Whitney U test did not show statistically significant differences for any of the variables evaluated ($p > 0.05$). The greater dispersion recorded in the ant-infested areas, particularly in moisture and

porosity, demonstrates greater spatial variability, the patterns of which may be associated with local soil dynamics. However, due to the sample size and imbalance, these results are considered exploratory and do not allow for establishing relationships.

In this sense, the study also provides information that discusses the role of potential bioturbation in the dynamics of urban wetlands, as it suggests that leafcutter ant activity may be associated with more local-scale changes in the physical organization of the soil. It is also proposed that the study of these biological interactions and their connection to the hydro-ecological processes of the ecosystem should be addressed with other experimental approaches or more comprehensive designs.

In this way, the work helps improve the understanding of soil as a dynamic system involving biotic and abiotic components, generating a first approximation for future research in the context of urban wetland management, conservation, and restoration.

Introducción

Los humedales urbanos son considerados ecosistemas estratégicos dentro de las ciudades por su función de regulación hídrica, conservación de biodiversidad y continuidad de funciones ecológicas. Desde una perspectiva de urbanización acelerada, los humedales urbanos son soluciones basadas en la naturaleza, ya que contribuyen en la reducción del riesgo asociado a las inundaciones, al aumento de la calidad del agua y del proceso de resiliencia frente a perturbaciones ambientales. Aun así, procesos vinculados con la expansión urbana y la fragmentación del paisaje o la intensidad de las actividades humanas producen dinámicas de degradación que inciden en su forma y funcionamiento (Muñoz, 2024). En el contexto de los humedales, sin embargo, el suelo representa uno de los componentes críticos para su mejor funcionamiento, ya que en el mismo tienen lugar procesos físicos, químicos y biológicos que regulan la dinámica hídrica, la organización estructural y las interacciones ecológicas. De todas sus propiedades como la porosidad del suelo, la estabilidad estructural, la textura o la capacidad retentiva de humedad son cruciales para evaluar su estado funcional, sobre todo en ecosistemas humanamente alterados o degradados (Díaz-Pinzon, 2025).

La dinámica del suelo puede estar alterada por la fauna edáfica, mediante procesos de bioturbación, ya que realizan actividades de excavación de galerías, movilización de partículas y creación de estructuras biogénicas, pudiendo alterar la organización física de ellos, lo que interesa a la heterogeneidad espacial y a la alteración de los atributos estructurales (Rojas, 2026). Entre estos organismos podemos mencionar a las hormigas arrieras cortadoras de hojas, que han sido ampliamente reconocidas como organismos modificadores del ambiente, debido a la intensa actividad constructiva que generan (Poreba, 2025). Diversos trabajos han demostrado que la construcción de nidos y galerías puede afectar las propiedades físicas del suelo, como la redistribución de partículas, la aireación y la construcción estructural. Sin embargo, el alcance y la dirección de los efectos sobre las propiedades del suelo dependen de las condiciones ambientales, del tipo de suelo y de la magnitud de la bioturbación (Ferreira, 2024). A pesar de que ya se han descrito algunas interacciones entre la actividad de hormigas arrieras cortadoras de hojas y los atributos físicos e hidrológicos del suelo, sigue existiendo un vacío de conocimiento sobre la actividad de estas en suelos de humedales urbanos tropicales. Esta situación resulta relevante para

ecosistemas con dinámicas ecológicas complejas y con presiones severas antrópicas, como puede ser el caso del humedal El Charco-Oasis.

En este sentido, el presente trabajo lleva a cabo un análisis exploratorio orientado a valorar la posible relación que existe entre la presencia de las hormigas arrieras y ciertos atributos físicos e hidrológicos del suelo en el humedal en cuestión, tomando como bases indicadores de la humedad gravimétrica, la porosidad, la textura, la estabilidad estructural, entre otros, de acuerdo con lo reportado en la literatura (Campos, 2024). Se realizo este estudio con base a un objetivo de un macroproyecto.

Los resultados intentan así mostrar tendencias y aproximaciones iniciales a una posible relación biológica y física, pero conociendo las limitaciones derivadas del tamaño muestral y de la escala de análisis. De este modo, esta investigación entra dentro de una línea de trabajo que estudia las interrelaciones de los procesos biológicos y físicos del suelo, ofreciéndonos una evidencia inicial mediante un estudio exploratorio. Los resultados deberán ser considerados en función de las limitaciones metodológicas del estudio, en especial el tamaño muestral y el nivel de análisis realizado.

Justificación

Las hormigas arrieras cortadoras de hoja han sido reconocidas en la literatura científica como organismos capaces de modificar el entorno edáfico en procesos de bioturbación, entre los cuales la excavación, construcción de galerías y movilización de partículas de suelo son actividades que pueden estar asociadas con variaciones en atributos físicos como la porosidad, la organización estructural del suelo y la distribución espacial de agregados, lo cual es importante para entender la dinámica edáfica en ecosistemas susceptibles , siendo esto un aspecto muy importante en la mejora de los humedales urbanos (Hölldobler &Wilson 2010). En este sentido, estudiar la posible relación existente entre la presencia de las hormigas arrieras y algunas propiedades físicas e hidrológicas del suelo es importante porque aquellas como la humedad gravimétrica, la porosidad, la textura y la estabilidad estructural permiten aproximarse a la condición física de un suelo y a patrones de heterogeneidad locales supeditadas a procesos biológicos (Cammeraat & Risch, 2008).

El uso de estos atributos aporta información útil para estudiar de qué manera algunos organismos del suelo podrían estar asociados a tratamientos locales que podrían ir modificando la biología del sustrato (Frouz y Jílková 2008). Al respecto, algunos autores han indicado que la bioturbación puede alterar la organización del suelo y generar condiciones espaciales de las propiedades físicas del mismo (Weil & Brady, 2017). En este sentido, los montículos y las estructuras biogénicas son un elemento interesante para comparar zonas con y sin actividad de hormigas, teniendo en cuenta, principalmente la estabilidad estructural y la distribución de los agregados (Lavelle y Spain 2001). Desde esta perspectiva, el análisis de estas relaciones puede proporcionar indicios preliminares sobre procesos pedagógicos escasamente documentados en humedales urbanos tropicales (Li et al. 2019). La importancia también puede apreciarse porque existen vacíos en el conocimiento respecto a la posible influencia de las hormigas arrieras en los atributos físicos del suelo en los ecosistemas urbanos intervenidos, donde se combina una compleja interacción de procesos ecológicos y la presión humana (Angst, 2024). En el caso del humedal El Charco-Oasis, esta información resulta de interés porque se tiene que generar insumos técnicos que fortalezcan el conocimiento sobre la dinámica del suelo en un ecosistema que se ha convertido en un lugar estratégico para la conservación (Castellanos, 2001).

En este sentido, la presente investigación se justifica por el análisis exploratorio de indicadores físicos e hidrológicos del suelo, mediante metodologías estandarizadas que permiten evidenciar las tendencias preliminares asociadas a la existencia o no de actividad bioturbadora (Villabona-González et al., 2021). Más que evidenciar relaciones causales estrictas, el estudio busca construir una base inicial de información que sea capaz de darle continuidad a nuevas investigaciones mediante el establecimiento de diseños experimentales con mayor capacidad inferencial (García-Pérez y Flores-Moreno 2019). En el mismo sentido, los resultados pueden aportarle elementos que sean útiles para la discusión en torno al papel funcional de la macrofauna edáfica en los procesos de organización del suelo y para fortalecer los enfoques de gestión y conservación que pongan de manifiesto la relevancia de reconocer las interacciones que se dan entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema. Con esta lógica, la investigación genera sustento no solo en términos académicos, sino también para ayudar a los procesos futuros de manejo y restauración de humedales urbanos (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2020). Por lo tanto, la justificación del estudio se apoya en la necesidad de ir avanzando en la comprensión del suelo como un sistema dinámico, cuya estructura y funcionamiento pueden ser explicados por los procesos biológicos.

Objetivos

Objetivos del macroproyecto

Los objetivos que se presentan a continuación corresponden al macroproyecto "Relación hormigas arrieras y servicios ecosistémicos del suelo en el humedal El Charco–Oasis, Villavicencio, Meta".

Objetivo General

Determinar la relación entre la presencia de las hormigas arrieras cortadoras de hojas y la dinámica de los microorganismos edáficos, así como su vínculo con los servicios ecosistémicos asociados al suelo del humedal El Charco Oasis, campus Aguas Claras, Universidad Santo Tomás, Villavicencio-Meta.

Objetivos específicos

1. Analizar la influencia de la presencia de hormigas arrieras cortadoras de hojas sobre la diversidad de microorganismos edáficos.
2. Determinar la relación entre la presencia o ausencia de montículos de hormigas arrieras cortadoras de hojas y la reserva y distribución de carbono orgánico total.
3. Diseñar una herramienta de capacitación que permita cambiar la percepción cultural de las hormigas como "plaga" y promueva su importancia en la provisión de servicios ecosistémicos del suelo.

Objetivos de la auxiliatura

Objetivo General

Analizar, de manera exploratoria, las variaciones de algunas propiedades físicas, estructurales e hidrológicas del suelo en puntos con y sin presencia visible de hormigas arrieras en el humedal El Charco–Oasis, mediante indicadores de humedad gravimétrica, densidad aparente, porosidad total, textura y estabilidad de agregados.

Objetivos específicos

1. Cuantificar y comparar los atributos fisicoquímicos del suelo en parcelas con presencia y ausencia de montículos de hormigas arrieras
2. Evaluar la estabilidad y distribución de agregados del suelo a través de ensayos de tamizado seco y húmedo en muestras recolectadas en campo, con el fin de cuantificar el efecto potencial de las hormigas arrieras en la estructura del suelo.
3. Evaluar el contenido de humedad gravimétrica y la textura aparente del suelo en muestras recolectadas en campo, mediante secado gravimétrico y clasificación manual al tacto, para identificar patrones de variación física entre zonas con presencia de montículos de hormigas arrieras y zonas de control.

1. Descripción y análisis de las actividades realizadas

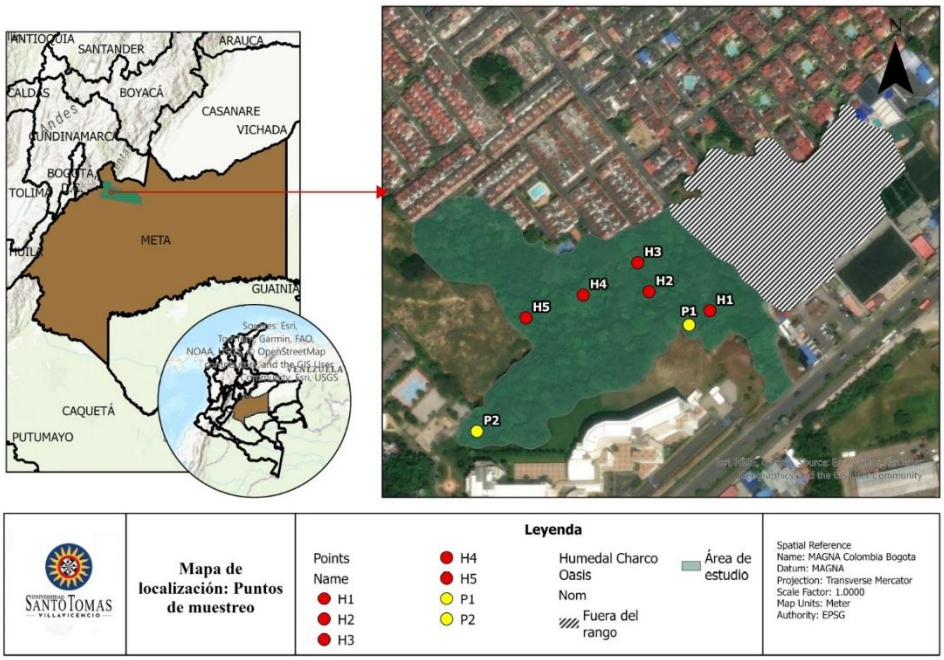
La presente auxiliatura de investigación se orientó a evaluar la posible influencia de la actividad bioturbadora de las hormigas arrieras sobre las propiedades físicas e hidrológicas del suelo en el humedal El Charco–Oasis, ubicado en el campus Aguas Claras de la Universidad Santo Tomás, en Villavicencio (Meta). Este ecosistema, con una extensión aproximada de 10,75 ha, se reconoce como un área de importancia ambiental debido a su función en la regulación hídrica y conservación de la biodiversidad, en concordancia con lo establecido en el Decreto 2372 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Parque Nacionales Naturales de Colombia , 2011).

El diseño metodológico de la auxiliatura fue observacional, comparativo y exploratorio; por tanto, no correspondió a un experimento manipulativo con asignación aleatoria de tratamientos ni replicación experimental estricta. Los siete puntos evaluados se definieron como unidades de muestreo de referencia dentro del humedal: dos puntos sin evidencia visible de hormigas arrieras (P1 y P2) y cinco puntos con presencia visible de actividad bioturbadora (H1–H5). Esta configuración permitió una comparación preliminar entre condiciones contrastantes de campo, pero limita la capacidad inferencial del estudio y exige interpretar los resultados como tendencias descriptivas o asociaciones locales, no como demostraciones causales. En este sentido, la ausencia de manipulación de variables, el bajo número de unidades de muestreo y la posible dependencia espacial entre puntos se reconocen como limitaciones centrales. Para fortalecer futuros análisis se recomienda ampliar y balancear el número de puntos control y con presencia de hormigas, incorporar réplicas espaciales independientes, medir covariables como humedad antecedente, materia orgánica y textura cuantitativa, y realizar campañas en diferentes periodos hidrológicos.

El desarrollo de las actividades se estructuró en tres fases: reconocimiento del área de estudio, toma de muestras en campo y análisis de propiedades físicas e hidrológicas del suelo, priorizando variables como humedad gravimétrica, porosidad, textura y estabilidad estructural, consideradas indicadores clave de la dinámica edáfica. La distribución espacial de los puntos de muestreo se presenta en la figura 1 y sus coordenadas geográficas establecidas en la Tabla 1.

Figura 1

Mapa de localización de los puntos de muestreo establecidos en el humedal El Charco–Oasis



Nota. **Tomada de**: (Niño Camacho & Romero Puentes, 2026) **Nota:** El área que no se realizó tomas es porque no hace parte del predio de la Universidad Santo Tomas de Villavicencio.

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"
H5	4° 7'23.44"	73°36'55.72"

1.1 Reconocimiento del área de estudio

Se realizó la identificación y delimitación del área de estudio mediante recorridos de campo, con el fin de localizar zonas con evidencia de presencia de Hormiga Arriera, particularmente montículos y estructuras asociadas a hormigas arrieras. A partir de este reconocimiento, se establecieron puntos de muestreo diferenciando entre zonas con presencia de bioturbación y zonas sin evidencia de actividad.

Se definieron dos puntos de control (P1 y P2), ubicados en sectores periféricos del humedal sin presencia visible de hormigas, y cinco puntos de muestreo (H1–H5) distribuidos en áreas con actividad bioturbadora como se observa en Figura 2. Esta diferenciación, no sólo permitió establecer una base comparativa para evaluar posibles variaciones, sino que al mismo tiempo centrar el análisis en las propiedades físicas del suelo asociadas a la actividad de las hormigas.

Figura 2

Reconocimiento del terreno presencia y ausencia de Hormiga Arriera



Nota. Registro fotográfico propio, (2026) Reconocimiento del terreno fotografía tomado durante la fase de campo en el humedal El Charco–Oasis,

1.2 Toma de muestras en campo

La recolección de muestras se llevó a cabo de acuerdo con las condiciones climatológicas del área, las cuales estaban caracterizadas por eventos de precipitación, lo que hace que sea válida para la interpretación de variables hidrológicas. Se realizó un transecto de aproximadamente 10 metros en cada punto de muestreo, y se tomaron muestras a una profundidad de 40 cm, utilizando barreno y cilindros volumétricos, con el fin de conservar la estructura natural del suelo como se documente en la Figura 3. Aparecieron aproximadamente 1,5 kg de suelo por punto de muestreo

para análisis físicos, asegurando su almacenamiento en recipientes herméticos con rotulación de información de georreferenciación, identificación y fecha. El manejo de las muestras se llevó a cabo bajo condiciones controladas para evitar alteraciones de la humedad y de la estructura del edáfica, siguiendo disposiciones del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y protocolos de (Agrosavia, 2018).

Figura 3

Extracción de muestra con barreno



Nota. Registro fotográfico propio (2026). Extracción de muestra con barreno procedimiento de muestreo.

Para la toma de muestras se tuvo en cuenta las variaciones climáticas que presentaban fuertes precipitaciones, posteriormente se definió un transecto de 10m a lo largo, los cuales se establecieron los puntos de muestreo, las muestras se extrajeron a una profundidad de 40 cm con la ayuda del barreno y cilindros volumétricos, recolectando aproximadamente 1,5kg de suelo y 1kg de adicional que fue enviado a la Universidad de los Llanos con el fin de aluminio extraíble (HCl 1 N), Ca, Mg, K y Na (cationes intercambiables con $AcNH_4$ 7 N a pH 7,0), elementos enores (Fe, Cu, Zn, Mn y B mediante DTPA), azufre (fosfato monobásico de calcio) y textura (Bouyoucos).

La toma de muestra se realizó conforme la guias oficiales de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), específicamente la GA-G-17 “Guía para la toma de muestras de suelo para análisis químicos y físicos” (2018) y la GA-I-48.

Figura 4

Almacenamientos de muestra de suelo



Nota. Registro fotográfico propio (2026). Almacenamiento de muestras en el humedal El Charco–Oasis

Cada muestra fue almacenada en recipientes herméticos, debidamente etiquetados con información de georreferencia, identificación del punto y la fecha y fueron trasladadas en condiciones controladas como se observa en la Figura4, esto evitando alteraciones en la humedad y/o en la estructura del suelo establecido en el (Instituto geográfico Agustín Codazzi.)

1.3 Determinación del porcentaje de humedad gravimétrica

Se realizó el secado de las muestras en el horno a 105°C hasta alcanzar más constante. Con ello se realizó el pesaje antes y después del secado, lo que permitió calcular el contenido de agua de la muestra con la diferencia de peso entre la muestra húmeda y la muestra seca. Este método es ampliamente utilizado en estudios de dinámica hídrica del suelo, especialmente en situaciones donde la actividad biológica promueve la formación de microporos o galerías, incrementando tanto la capacidad de almacenamiento como la redistribución de la humedad en el perfil edáfico (Hillel, 2003).

En consecuencia, la humedad gravimétrica del suelo se determinó mediante el metodo descrito por (Gardner, 1986), el cual se expresa la relación entre la masa de agua contenida en la muestra y masa seca del suelo como se expresa en la siguiente ecuación:

Ecuación 1 *Humedad gravimétrica*

$$(\theta g) = \frac{[(Mh - Ms)]}{Ms} \times 100$$

Donde:

- *Mh* = masa húmeda del suelo
- *Ms* = masa seca del suelo

Tabla 2

Resultados reportados de humedad gravimetrica

Muestra	%Humedad
P1	29.1
P2	32.7
H1	28.6
H2	30.7
H3	31.7
H4	28.3
H5	19.3

El análisis del contenido de humedad gravimétrica mostró diferencias entre los puntos de control y aquellos con presencia de hormigas arrieras. Los puntos donde se registró presencia de hormigas presentaron un promedio de humedad de 30,9 %, mientras que los puntos de control registraron un promedio de 27,7 % como se presentan en la Tabla 2. Aunque la diferencia observada fue pequeña, esta podría estar asociada a cambios en la estructura física del suelo ocasionados por la actividad excavadora de las hormigas, la cual favorece la formación de galerías y macroporos que incrementan la infiltración y modifican la redistribución del agua dentro del perfil. Asimismo, la mayor variabilidad espacial observada en los sitios con presencia de hormigas sugiere una mayor heterogeneidad estructural e hidrológica del suelo. Estos resultados son consistentes con lo reportado por (Nascimento et al, 2024**),** quienes describen a las hormigas arrieras como importantes agentes de bioturbación capaces de modificar la conectividad de los poros, la dinámica del agua y la organización física del suelo, así como con **(**Jouquet et al, 2014**),** quienes señalan que

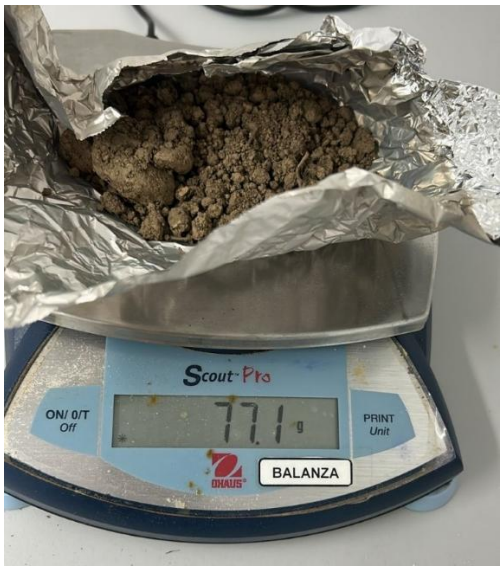
estos organismos actúan como ingenieros ecosistémicos al transformar las propiedades físicas e hidrológicas del suelo.

1.4 Determinación de la porosidad

La porosidad de la muestra de suelo se obtiene mediante el método del cilindro de volumen conocido en condiciones de laboratorio; complementada con el método gravimétrico de secado de la FAO (2023). Inicialmente, se obtiene una muestra inalterada mediante un recipiente volumétrico previamente calibrado, de forma que podamos conservar la estructura natural del suelo. Una vez obtenida la muestra de suelo, se anota su peso húmedo y posteriormente se seca en estufa a 105 °C durante 24 horas alcanzando el peso constante. Una vez finalizado el proceso de secado, las muestras fueron pesadas como se observa en la Figura 5, con base a esta información y el volumen del recipiente, se obtuvo la densidad aparente del suelo. Por último, conociendo la densidad real de partículas minerales del suelo de forma clásica (2,65 g/cm³) se obtiene la porosidad total a partir de la relación entre la densidad aparente y la densidad real. De este modo se ha podido cuantificar el porcentaje de espacios vacíos de la muestra. (Manual de métodos analíticos de laboratorio de suelos, 2023).

Figura 5

Pesaje de la muestra después del secado de las muestras de suelo del humedal el Charco- Oasis



Nota. Registro fotográfico propio (2026) Pesaje de la muestra después del secado de las muestras de suelo del humedal el Charco- Oasis

La densidad aparente se determinó mediante el método del cilindro y volumen antes descrito, calculando la relación entre la masa seca del suelo y el volumen total de la muestra, según lo establecido en la metodología descrita por (Blake & Hartge, 1986)

Ecuación 2 *Densidad aparente*

$$\rho_b = \frac{M_s}{V}$$

Donde:

- $\boldsymbol{\rho b}$ = densidad aparente
- Ms = masa seca de la materia
- V = volumen total de la muestra

Posteriormente, la porosidad total del suelo se estimó a partir de la relación entre la densidad aparente y la densidad de partículas, siguiendo el método propuesto por Danielson y Sutherland (1986)**.**

Ecuación 3 *Porosidad*

$$n = \left(1 - \frac{\rho d}{\rho s}\right) x100$$

Donde:

- n = porosidad
- ρd= densidad aparente del suelo g/cm^3
- ρs=densidad de partículas o densidad real del suelo g/cm^3

Tabla 3

Análisis de la densidad aparente, densidad de partículas y porosidad de las muestras de suelo del humedal el Charco-Oasis.

Parámetro	Unidad	P1	P2	H1	H2	H3	H4	H5
Densidad aparente	g/cm^3	1.51	1.52	1.51	1.50	1.49	1.53	1.63
Densidad de partículas	g/cm^3	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Porosidad	%	43.01	42.64	43.01	43.40	43.77	42.26	38.50

Los resultados expuestos en la Tabla 3. evidenciaron la relación inversa existente entre la densidad aparente y la porosidad total, considerando que la densidad de partículas se mantuvo constante (2,65 g/cm³) en todos los puntos evaluados. De los siete puntos analizados, seis presentaron porosidades relativamente similares, comprendidas entre 42,26 % y 43,77 %, mientras que el punto H5 registró el menor valor (38,50 %), asociado a la mayor densidad aparente (1,63 g/cm³). Los puntos de referencia sin presencia de hormigas arrieras (P1 y P2) presentaron densidades aparentes de 1,51 y 1,52 g/cm³ y porosidades de 43,01 % y 42,64 %, respectivamente, con promedios de 1,52 g/cm³ y 42,64 %. Este comportamiento coincide con los principios de la física de suelos, según los cuales un incremento de la densidad aparente, manteniéndose constante la densidad de partículas, implica una disminución de la porosidad total debido a la reducción del volumen de espacios vacíos (Hillel, 2003; Brady & Weil, 2017).

Con respecto a los puntos de referencia, H1, H2 y H3 registraron densidades aparentes iguales o ligeramente inferiores (1,49–1,51 g/cm³), acompañadas de porosidades entre 43,01 % y 43,77 %. En particular, H2 y H3 presentaron incrementos de 0,58 y 0,95 puntos porcentuales en la porosidad respecto al promedio de los controles. Según diversos estudios han demostrado que la excavación de galerías y cámaras por hormigas arrieras modifica las propiedades físicas del suelo mediante procesos de bioturbación, favoreciendo la formación de macroporos, la redistribución de partículas, la aireación y el movimiento del agua, además de generar cambios en la resistencia mecánica y en la estructura del perfil del suelo (Moutinho et al., 2003; Frouz & Jílková, 2008; Jouquet et al., 2006). Estos mecanismos son compatibles con el comportamiento observado en H1, H2 y H3, donde se registraron menores densidades aparentes y mayores porosidades respecto a los puntos de referencia.

En contraste, H4 y H5 presentaron las mayores densidades aparentes (1,53 y 1,63 g/cm³) y las menores porosidades (42,26 % y 38,50 %, respectivamente), siendo H5 el punto con la mayor disminución de porosidad respecto al promedio de los controles (4,33 puntos porcentuales). Este comportamiento indica que la actividad de las hormigas no genera un efecto uniforme sobre la estructura física del suelo. Sousa et al. (2023) reportaron que las paredes de las cámaras de nidos de *Atta sexdens* pueden presentar una porosidad inferior a la del suelo circundante debido a la reorganización y consolidación de las partículas durante la construcción del nido. De igual forma, la literatura reconoce que las hormigas, al actuar como ingenieras ecosistémicas, pueden producir simultáneamente sectores con elevada macroporosidad asociados a galerías activas y zonas

localmente densificadas relacionadas con la consolidación de cámaras o el colapso parcial de conductos, generando una marcada heterogeneidad espacial en las propiedades físicas del suelo (Jones et al., 1994; Jouquet et al., 2006).

En conjunto, los resultados indican que la presencia de hormigas arrieras no produjo un efecto homogéneo sobre la porosidad total del suelo, sino una variabilidad espacial que probablemente refleja la interacción entre la actividad constructiva de las colonias y las características intrínsecas del suelo, como la textura, el contenido de humedad, la materia orgánica y el estado de desarrollo del nido. En consecuencia, los resultados respaldan el papel de las hormigas arrieras como organismos capaces de modificar la estructura física del suelo mediante su actividad excavadora, sin embargo, establecer una relación causal requiere complementar estas observaciones con mediciones de resistencia a la penetración, distribución del tamaño de poros, carbono orgánico y densidad aparente en diferentes profundidades.

1.5 Análisis de textura

Este parámetro se realizó por el método de las pruebas RASTA, La textura del suelo se describió mediante el método de textura al tacto, el cual permite una clasificación cualitativa en campo o en laboratorio a partir de la plasticidad, adhesividad, formación de cinta, sensación al tacto y comportamiento del material humedecido. Este procedimiento se utilizó como aproximación descriptiva, no como sustituto de un análisis granulométrico cuantitativo. Por tanto, los resultados de textura se interpretan como una caracterización preliminar de las muestras y no como porcentajes exactos de arena, limo y arcilla. (Assessment, 2010).

Tabla 4

Clasificación textural de las muestras de suelo mediante análisis manual

TIPO DE TEXTURA	MUESTRA	REGISTRO
Franco- Arcilloso (Far)	P1	

TIPO DE TEXTURA	MUESTRA	REGISTRO
		
Franco- Arcilloso (Far)	P2	 
Franco- Arcilloso (Far)	H2	 

TIPO DE TEXTURA	MUESTRA	REGISTRO
Franco- Arcilloso (Far)	H3	 
Franco- Arcilloso (Far)	H4	 

TIPO DE TEXTURA	MUESTRA	REGISTRO
Franco- Arcilloso (Far)	H5	 
Arcilloso- Arenoso (ArA)	H1	 

La evaluación de la textura del suelo mediante el método al tacto se empleó como una herramienta cualitativamde reconocimiento preliminar, adecuada para estudios exploratorios con recursos limitados y orientados a identificar clases texturales generales en campo o laboratorio básico. Su selección se justificó porque permite una clasificación rápida de la textura dominante a partir de propiedades observables como plasticidad, adherencia, formación de cinta, consistencia y sensación al tacto, lo cual resulta útil para interpretar de manera inicial la retención de humedad, la aireación y la respuesta estructural del suelo. No obstante, este método no sustituye técnicas cuantitativas de mayor precisión, como Bouyoucos o pipeta, por lo que los resultados se interpretan únicamente como categorías texturales aproximadas y no como porcentajes exactos de arena, limo y arcilla. En consecuencia, las diferencias observadas en humedad, porosidad y estabilidad de agregados no deben atribuirse exclusivamente a la textura, sino analizarse de forma integrada con la densidad aparente, la materia orgánica, la humedad antecedente y la posible actividad bioturbadora. Para versiones posteriores del estudio se recomienda complementar esta clasificación con análisis granulométrico cuantitativo.

Lo cual permitió identificar una predominancia de la clase textural franco arcillosa en la mayoría de los puntos analizados (P1, P2, H2, H3, H4 y H5), lo que sugiere una matriz edáfica relativamente homogénea en el humedal El Charco. Esta textura se caracteriza por una combinación equilibrada de fracciones finas y medias, proporcionando adecuada capacidad de retención de agua, disponibilidad de nutrientes y condiciones favorables para el desarrollo radicular y la actividad biológica y una adecuada aireación del suelo, condiciones clave para ecosistemas con dinámica hídrica variable. (Jay Jabro, 2024). La similitud textural entre los puntos de control y la mayoría de los sitios con presencia de hormigas indica que las diferencias observadas en variables como humedad o porosidad no estarían asociadas principalmente a cambios texturales naturales del terreno, sino posiblemente a modificaciones estructurales generadas por la presencia de Hormiga Arriera. Zhou et al. (2023) Por otra parte, el punto H1 presentó una textura arcilloso-arenosa, evidenciando una mayor proporción de arena respecto a los demás sitios, como se evidencia en la Tabla 4. Esta condición puede favorecer un drenaje más rápido, menor retención hídrica y mayor aireación del suelo, lo cual podría estar relacionado con procesos de selección y transporte de partículas por parte de las hormigas arrieras durante la construcción de galerías y montículos. En conjunto, los resultados permiten inferir que, aunque predomina una textura base homogénea en el área de estudio, la actividad de las hormigas podría

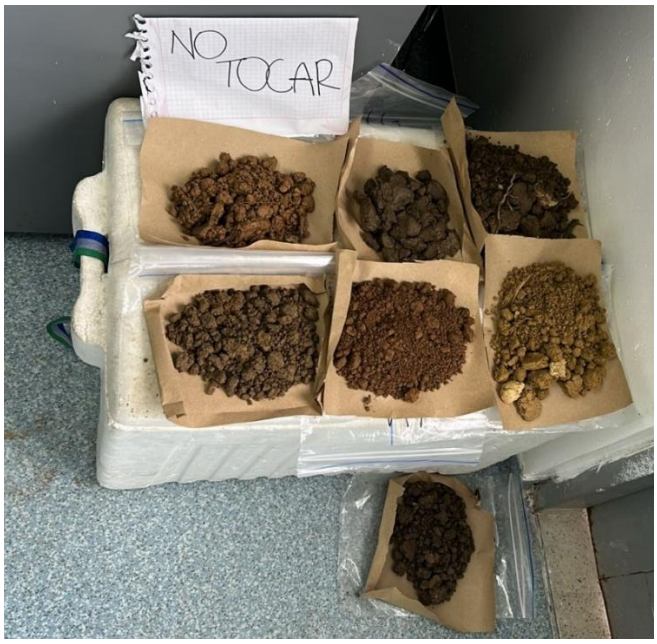
inducir variaciones locales en la distribución de partículas, contribuyendo a la heterogeneidad física del suelo (Nascimento et al., 2024).

1.6 Análisis de estabilidad de agregados

Se llevó a cabo la determinación de estabilidad estructural del suelo mediante el método de tamizado húmedo estandarizado por el IGAC, para ello, las muestras fueron secadas al aire libre que tardo alrededor de 1 mes evidenciado en le Figura 6 para que estuvieran completamente secas.

Figura 6

Secado al aire libre de las muestras de suelo puntos de muestreo tomadas en el humedal Oasis



Nota. Registro fotográfico propio (2026). Secado al aire libre de las muestras de suelo del acondicionamiento previo al tamizado húmedo

Posteriormente se llevaron a tamices de #4, #10, #20, #40 y #60 para obtener los agregados naturales, los cuales fueron sometidos a un ciclo controlado de inmersión y agitación en agua destilada, esto con el objetivo de evaluar la resistencia a la desintegración como se ilustra Figura 7.

Figura 7

Método "Lavado" de los agregados de las muestras del humedal El charco-Oasis



Nota. Registro fotográfico propio (2026). Método "Lavado" de los agregados de las muestras del humedal El charco-Oasis

a partir de esto se evaluó el porcentaje de agregados estables en el agua (%EAA) y el Diámetro Medio Ponderado (DMP), dos de los principales índices utilizados para comparar la influencia de la bioturbación de las hormigas arrieras sobre la estructura del suelo. Este análisis es fundamental para evaluar la capacidad del suelo de resistir procesos de erosión y degradación física (IGAC, 2023).

Se establecieron las siguientes ecuaciones, las cuales se determinó a partir de la distribución de agregados retenidos en cada tamiz según (Kemper & Rosenau, 1986)

Ecuación 4 *Dada la ecuación de Agregados estables al agua:*

$$(\%EAA) = (Pt / Pe) \times 100$$

Donde:

Pt: peso de los agregados estables después del tamizado húmedo

Pe: peso total de la muestra inicial

Ecuación 5 *diámetro medio ponderado (DMP*

$$\Sigma(xi \cdot wi)$$

Donde:

xi: diámetro medio de cada clase de tamaño

wi : proporción de suelo retenido en cada tamiz respecto al total

Tabla 5

Valores de DMP (Diámetro medio ponderado) y porcentaje de agregados estables en agua (%EAA)

Muestra	DMP (mm)	%EAA
P1	10.07	4,080
P2	9.86*	8,26
H1	9.86*	13,23
H2	9.86*	10,87
H3	9.86*	3,64
H4	9.86*	11,01
H5	9.86*	10,63

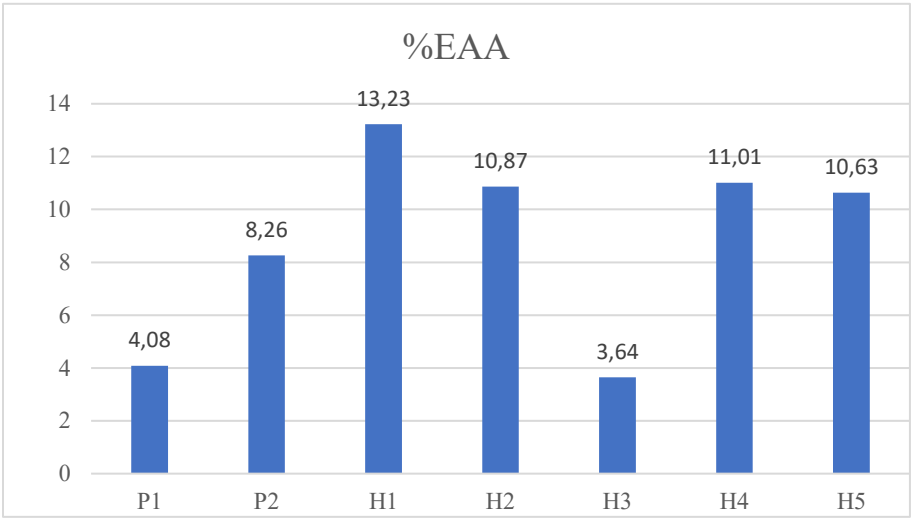
Nota: Se identificó que el valor del DMP se repite en la mayoría de las muestras (9,86 mm), lo cual no es consistente con la variabilidad esperada en la distribución de agregados del suelo. Este comportamiento sugiere la presencia de una limitación en el procesamiento de los datos suministrados en la Tabla 5, posiblemente asociada a:

- El uso de proporciones de masa similares entre muestras,
- La no normalización adecuada de las fracciones retenidas, o
- la aplicación de valores constantes en el cálculo del diámetro medio.

Debido a esto, el DMP no se considera un indicador confiable para la comparación entre tratamientos en este estudio, por lo que el análisis se centra en el porcentaje de agregados estables al agua (%EAA), el cual sí refleja variabilidad entre las muestras evaluadas.

Figura 8

Porcentaje de agregados estables al agua (%EAA) en las muestras de suelo evaluadas en el humedal El Charco–Oasis.



*Nota***.** Elaborado a partir de los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad estructural del suelo, donde P se reconocen como nuestras de control y H muestras con presencia de hormiga

Los resultados de estabilidad de agregados como se muestra en la Figura 8; En el diagrama de barras, evidenciaron diferencias entre los puntos de control y aquellos con presencia de hormigas arrieras en el humedal El Charco–Oasis. En términos de porcentaje de agregados estables al agua (%EAA), los puntos de control presentaron valores de 4,08 % (P1) y 8,26 % (P2), mientras que varias muestras con actividad bioturbadora registraron valores superiores, como H1 (13,23 %), H2 (10,87 %), H4 (11,01 %) y H5 (10,63 %). No obstante, el punto H3 observó un valor bajo (3,64 %), lo que sugiere que el efecto no se presenta de forma homogénea y responde a condiciones a nivel local del suelo. Esta variabilidad es acorde con la compleja dinámica de los suelos en ecosistemas como los humedales mixtos debido a la interrelación de varios factores físicos y biológicos (Ferreira et al. 2024; Poreba et al. 2025). Estos resultados apuntarán en la dirección de una posible relación entre la actividad de las hormigas con una mayor estabilidad estructural del suelo, obteniendo posiblemente debido a la mezcla de partículas minerales y materia orgánica y a la formación de agregados de mayor resistencia. La literatura Avala que la macrofauna edáfica, y en especial las hormigas, cumplen funciones de modificadores del suelo, favoreciendo la agregación y la cohesión estructural a través de la bioturbación (Cammeraat & Risch, 2008; Frouz & Jílková, 2008). Por otro lado, la interacción materia orgánica y estructura del suelo juegan un

papel importante sobre la estabilidad de los agregados y sobre la resistencia a la acción del agua (Six et al., 2004; Lehmann et al., 2020).

En cuanto al Diámetro Medio Ponderado (DMP), los valores fueron presentados como constantes en la mayoría de las muestras (9,86 mm), con excepción de P1 (10,07 mm). La baja variabilidad indica una limitación en el cálculo de este por lo que no se considera representativo para el análisis comparativo. Desde el punto de vista físico, una distribución real de los agregados debería distinguirse en función de la estructura, textura y humedad (Hillel, 2003; Brady & Weil, 2017), de ahí que él %EAA se constituyera como el parámetro más confiable en la evaluación de la estabilidad estructural. En conjunto los resultados permiten apuntar a la existencia de una tendencia a una mayor resistencia del suelo frente a la acción del agua en lugares donde se han observado hormigas, lo que podría reforzar el papel de éstas como organismos funcionales en el ecosistema , que se asemeja a un enfoque en el que se concibe a la biota del suelo como un elemento crucial y esencial dentro de la prestación de servicios ecosistémicos, así como en la regulación de los procesos de dicho medio, en especial en suelos urbanos y humedales (Lavelle & Spain, 2001; Campos et al., 2024; Rojas Quezada et al., 2026; Díaz-Pinzón et al., 2025).

1.7 Análisis estadístico de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo

El análisis estadístico se efectuó con base en las siete unidades de muestreo evaluadas durante la investigación, conformadas por dos puntos de referencia sin presencia visible de montículos de hormigas arrieras (P1 y P2), considerados como grupo control, y cinco puntos con presencia de hormigas (H1, H2, H3, H4, H5). Cada punto de muestreo se definió como la unidad experimental para el análisis de las variables físicas e hidrológicas del suelo. Inicialmente, se realizó un análisis descriptivo de los datos mediante medidas de tendencia central y dispersión. Posteriormente, debido al reducido tamaño de la muestra y a la distribución de los datos, se empleó la prueba no paramétrica exacta de Mann–Whitney para comparar la distribución de las variables entre ambos grupos y determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas. La selección e interpretación de esta prueba se sustentó en la metodología propuesta por Mann y Whitney (1947)**,** Fay y Proschan (2010) y Ernst (2004).

1.7.1 Selección de variables para el análisis estadístico

La prueba Mann- Whitney U se aplicó de manera independiente para las siguientes variables cuantitativas:

- Humedad gravimétrica (%).
- Porosidad total (%).
- Porcentaje de agregados estables al agua (%EAA).

Algunos parámetros no fueron incluidos en el análisis estadístico como la textura ya que se trató descriptivamente por ser unas variables categórica. Así mismo el diámetro medio ponderado (DMP) no se incorporó al análisis debido a que el valor de 9,86mm se repitió en seis de las siete muestras tomas en el humedal el Charco- Oasis. En consecuencia, para el análisis inferencial se seleccionaron únicamente los valores individuales de las tres variables presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6

Valores individuales utilizados para el análisis estadístico

Punto	Grupo	Humedad (%)	Porosidad (%)	%EAA
P1	Control	29,10	43,01	4,08
P2	Control	32,70	42,64	8,26
H1	Con hormigas	28,60	43,01	13,23
H2	Con hormigas	30,70	43,40	10,87
H3	Con hormigas	31,70	43,77	3,64
H4	Con hormigas	28,30	42,26	11,01
H5	Con hormigas	19,30	38,50	10,63

Nota: La tabla se fundamenta a partir de las tablas 2,3 y5 de la investigación

1.7.2 Análisis descriptivo de las variables fisicoquímicas del suelo

Para cada variable y grupo se calculó la media aritmética, la desviación estándar muestral, la mediana y el intervalo observado entre el valor mínimo y el máximo como se observa en la Tabla 7.

Triola (2022) señala que la media aritmética y la desviación estándar son medidas fundamentales de tendencia central y dispersión, respectivamente, por ello las expresiones utilizadas fueron:

Ecuación 6 *Media aritmética ($\bar{x}$) para cada variable:*

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

($\bar{x}$) = Media aritmética o promedio de los datos.

∑= Sumatoria de todos los valores

x_i= Cada uno de los datos de la muestra

n= Número total de datos u observaciones de la muestra.

Ecuación 7 *la desviación estándar (s) para cada variable:*

$$s = \sqrt[2]{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Donde:

∑= Sumatorias de todos los valores cuadrados

x_i = Cada uno de los datos de la muestra

($\bar{x}$) = Media aritmética o promedio de los datos.

n= Número total de datos u observaciones de la muestra.

Donde s es la desviación estándar muestral. Se utilizó n − 1 en el denominador para estimar la variabilidad de la población a partir de una muestra (NIST/SEMATECH, 2012).

Tabla 7

Valores calculados de Media aritmética, desviación estándar, mediana y min-Max

Variable	Grupo	n	Media	DE	Mediana	Mín.-máx.
Humedad (%)	Control	2	30,90	2,55	30,90	29,10-32,70
Humedad (%)	Con hormigas	5	27,72	4,92	28,60	19,30-31,70
Porosidad (%)	Control	2	42,83	0,26	42,83	42,64-43,01
Porosidad (%)	Con hormigas	5	42,19	2,14	43,01	38,50-43,77
%EAA	Control	2	6,17	2,96	6,17	4,08-8,26
%EAA	Con hormigas	5	9,88	3,64	10,87	3,64-13,23

1.7.3 Fundamento de la prueba mann- whitney u

La prueba Mann- Whitney U compara dos grupos independientes mediante el orden relativo de sus resultados, En ese sentido, la hipótesis nula establece que ambas muestras provienen de poblaciones con distribuciones equivalentes; por tanto, la interpretación de sus resultados como una comparación de medianas solo es válida cuando las distribuciones presentan una forma similar (Fay & Proschan, 2010; Hollander et al., 2014). En la presente investigación se empleó la versión exacta de la prueba, debido al reducido tamaño de la muestra y al desbalance entre los grupos de estudio (grupo control, $n = 2$); grupo con presencia de hormigas, $n = 5$), condición en la que las aproximaciones asintóticas pueden generar estimaciones menos confiables del valor de significancia (Fay & Proschan, 2010).

Nivel de significancia

El criterio de decisión se estableció con un nivel de significancia de:

$$\alpha = 0{,}05$$

Por lo tanto:

- Si p < 0,05, se rechaza la hipótesis nula.
- Si p > 0,05, no se rechaza la hipótesis nula.

Para cada variable se formularon las siguientes hipótesis:

- H_0: No existen diferencias significativas entre las zonas con y sin actividad bioturbadora
- H_1: Existen diferencias significativas entre ambos grupos

Se adoptó un nivel de significancia de $\alpha = 0{,}05$. Si $p < 0{,}05$ se rechaza H_0; si $p \geq 0{,}05$ no se rechaza H_0. No rechazar H_0 no demuestra que los grupos sean iguales, sino que los datos disponibles no aportan evidencia suficiente para establecer una diferencia mediante el diseño empleado. El valor p debe interpretarse conjuntamente con la magnitud y dirección de los resultados, y no como la probabilidad de que la hipótesis nula sea verdadera (Wasserstein & Lazar, 2016; Greenland et al., 2016).

La utilización de una prueba no paramétrica resulta consistente con las recomendaciones metodológicas para estudios de suelos con tamaños muestrales reducidos y alta variabilidad espacial (Hillel, 2003; Brady & Weil, 2017; Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2023). En consecuencia, los resultados inferenciales obtenidos constituyen un soporte estadístico adecuado

para complementar el análisis descriptivo y la discusión ecológica desarrollados en las secciones anteriores.

1.7.4 Asignación de rangos, cálculo de u y valor p exacto

Para cada variable se combinaron las siete muestras, se ordenaron de menor a mayor y se asignaron rangos del 1 al 7. Cuando dos valores fueron iguales, ambos recibieron el promedio de los rangos que les correspondían. Este tratamiento, propio de los procedimientos de rangos, se aplicó al empate de porosidad entre P1 y H1, ambos con 43,01 % (Mann & Whitney, 1947; Fay & Proschan, 2010).

Ecuación 8 *Estadístico U de Mann–Whitney para el grupo control Mann y Whitney (1947) y Fay y Proschan (2010).*

$$U_{\mathrm{C}} = R_{\mathrm{C}} - \frac{n_{\mathrm{C}}(n_{\mathrm{C}} + 1)}{2}$$

Donde:

- U_c *:* estadístico U asociado al grupo control.
- R_c suma de los rangos asignados a las observaciones del grupo control.
- n_c: número de observaciones del grupo control. En esta investigación:

Ecuación 9

$$U_{\mathrm{H}} = n_{\mathrm{C}}\, n_{\mathrm{H}} - U_{\mathrm{C}}$$

Ecuación 10

$$U_{\mathrm{mín}} = \mathrm{mín}(U_{\mathrm{C}}, U_{\mathrm{H}})$$

Donde R_{C} es la suma de rangos del grupo control; $n_{\mathrm{C}} = 2$; $n_{\mathrm{H}} = 5$; y $n_{\mathrm{C}}\, n_{\mathrm{H}} = 10$.

Bajo H_0, el valor esperado es:

$$\mathrm{E}(U_{\mathrm{C}}) = \frac{n_{\mathrm{C}}\, n_{\mathrm{H}}}{2} = 5.$$

$$(U_{\mathrm{C}}) = \frac{10}{2} = 5.$$

El valor *p* se obtuvo mediante una prueba exacta bilateral por permutación. El número total de asignaciones posibles se calculó con el coeficiente binomial, porque había siete observaciones totales y dos de ellas debían ubicarse en el grupo control:

$$C(7,2) = \frac{7!}{(2!5!)} = 21.$$

En consecuencia, existen 21 formas distintas de escoger cuáles dos rangos podrían pertenecer al grupo control si la hipótesis nula fuera cierta. A partir de esas 21 combinaciones se calcularon todos los valores posibles del estadístico U y se contó cuántas combinaciones resultaban tan extremas o más extremas que la observada.

Ecuación 11 *Valor P exacto bilateral por permutaciones Ernst (2004) y Fay y Proschan (2010)*

$$p_{\text{exacto}} = \frac{\mathrm{N}\left(\left|U_{\mathrm{C}}^{(\pi)} - 5\right| \geq \left|U_{\mathrm{C}}^{(\mathrm{obs})} - 5\right|\right)}{\binom{7}{2}}$$

Como medida descriptiva de dirección y separación se calculó adicionalmente el delta de Cliff (δ), definido a partir de las diez comparaciones posibles entre una observación del grupo con hormigas y una del grupo control (Cliff, 1993):

Ecuación 12 *Delta de Cliff*

$$\delta = \frac{\mathrm{N}(\mathrm{H} > \mathrm{C}) - \mathrm{N}(\mathrm{H} < \mathrm{C})}{n_{\mathrm{H}}\, n_{\mathrm{C}}}$$

Un δ positivo indica tendencia a valores mayores en el grupo con hormigas; un δ negativo indica tendencia a valores mayores en el grupo control; y un valor cercano a cero indica amplia superposición. Esta medida se interpreta de forma descriptiva debido al tamaño de la muestra (Cliff, 1993).

2. Resultados estadísticos comparación entre puntos de muestreo (presencia de hormiga y sin presencia de hormiga)

2.1 Prueba estadística humedad gravimétrica (%)

El grupo control presentó 30,90 ± 2,55 % y una mediana de 30,90 %, mientras que el grupo con hormigas presentó 27,72 ± 4,92 % y una mediana de 28,60 %. La media del grupo con hormigas fue 3,18 puntos porcentuales menor, equivalente a una diferencia descriptiva de −10,3 % respecto del control. La mayor dispersión del grupo con hormigas estuvo influida principalmente por H5 (19,30 %). Como se indica en la tabla 8 y representada en la Figura 9.

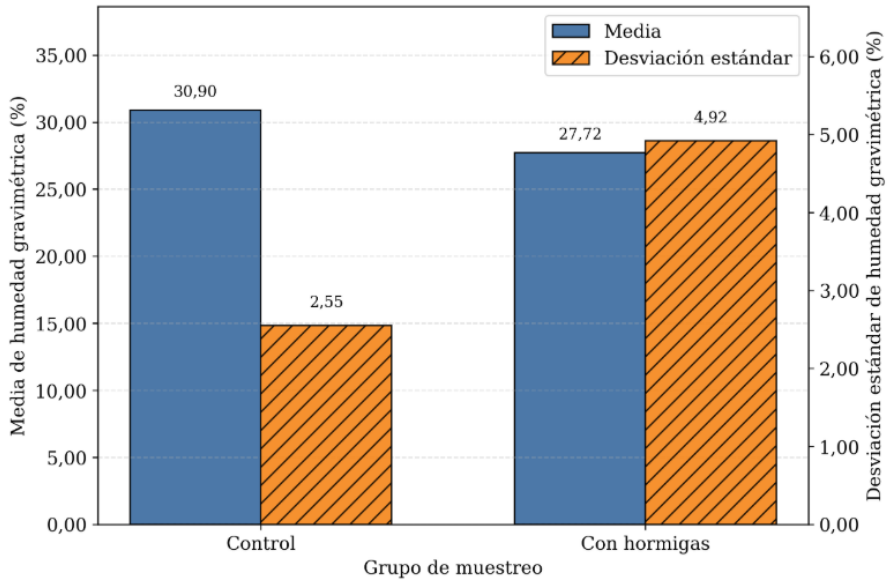
Tabla 8

Valores promedio de humedad gravimétrica (%) por grupo experimental

Grupo	n	Media (%)	Desviación estándar
Control (P1–P2)	**2**	**30.90**	**2.55**
Con hormigas (H1–H5)	**5**	**27.72**	**4.92**

Figura 9

Humedad gravimétrica promedio y desviación estándar en los grupos experimental y control del humedal El Charco–Oasis.



NOTA. Elaboración a partir de los resultados obtenidos en el análisis de humedad gravimétrica del suelo. Los valores representan las medias de cada grupo experimental.

Los resultados demuestran que las zonas sin presencia de Hormiga Arriera muestran un contenido de humedad ligeramente superior. No obstante, la desviación estándar en zonas con hormigas es mayor, lo que indica una mayor variabilidad espacial del contenido de agua en el suelo. (Frouz & Jílková, 2008; Cammeraat & Risch, 2008)

Tabla 9

Ordenamiento de rangos de la humedad gravimétrica

Punto	Grupo	Humedad (%)	Rango
H5	Con hormigas	19,30	1
H4	Con hormigas	28,30	2
H1	Con hormigas	28,60	3
P1	Control	29,10	4
H2	Con hormigas	30,70	5
H3	Con hormigas	31,70	6
P2	Control	32,70	7

Con base en el ordenamiento de rangos representados en la Table 9, la suma de rangos del grupo control fue R_C = 11. Por tanto,

$$U_C = R_C - \frac{n_C(n_C + 1)}{2} = 11 - 3 = 8$$

$$U_H = n_C\, n_H - U_C = 10 - 8 = 2$$

$$U_{mín} = \text{mín}(U_C, U_H) = (8,2)$$

Entre las 21 asignaciones posibles, 8 fueron tan extremas o más extremas que la observada; por ello,

$$p \text{ exacto } \frac{8}{21} = 0{,}381$$

$$\delta = \frac{(2 - 8)}{10} = -0{,}60$$

Además, δ indica una tendencia descriptiva hacia mayor humedad en el grupo control.

Como p = 0,381 ≥ 0,05, no se rechaza H_0. Con estos datos no puede afirmarse que la distribución de la humedad difiera estadísticamente entre grupos. La reducción observada debe tratarse como una tendencia exploratoria y no como demostración de que las galerías hayan causado una mayor infiltración o drenaje (Cammeraat et al., 2002; Frouz & Jílková, 2008).

Este comportamiento coincide con lo reportado por Jay Jabro (2024), quien describe que la distribución de poros influye claramente en la retención y redistribución del agua. En este caso,

la presencia de galerías generadas por hormigas podría favorecer la infiltración, al reducir la acumulación superficial, pero aumenta la heterogeneidad hídrica.

2.2 Porosidad (%)

La porosidad fue de 42,83 ± 0,26 % en el grupo control y de 42,19 ± 2,14 % en el grupo con hormigas. Las medianas fueron 42,83 % y 43,01 %, respectivamente. La diferencia entre la media y la mediana del grupo con hormigas se explica por el valor bajo de H5 (38,50 %); los demás puntos con hormigas se ubicaron entre 42,26 % y 43,77 %, evidenciados en la Table 10 y grafica 10.

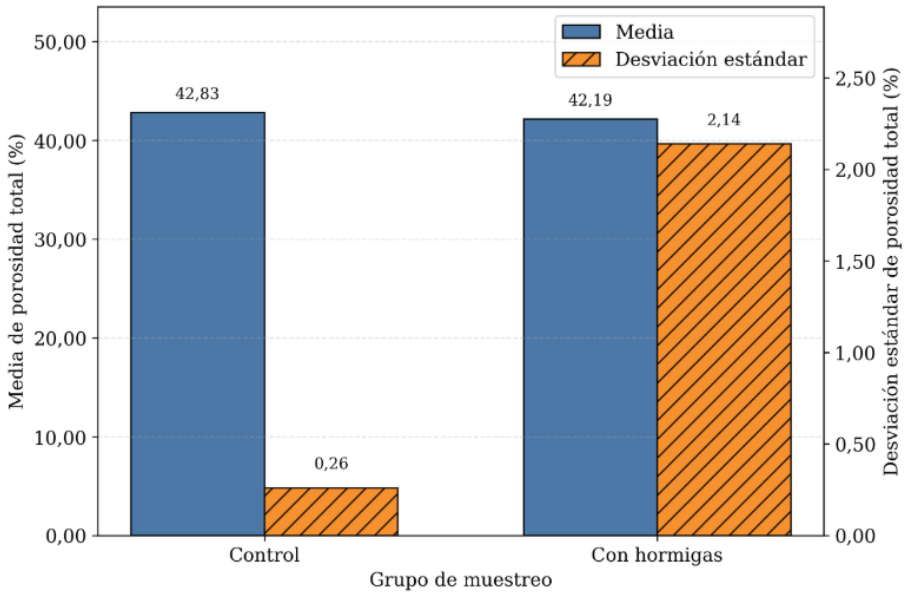
Tabla 10

Valores promedio de porosidad (%) por grupo experimental

Grupo	n	Media (%)	Desviación estándar
Control	2	42.83	0.26
Con hormigas	5	42.19	2.14

Figura 10

Porosidad total promedio y desviación estándar de grupos con presencia de hormigas y de control.



Nota. El grafico de barras representa la media de cada grupo experimental calculada a partir de los resultados anteriores.

Tabla 11

Ordenamiento y rangos de la porosidad total

Punto	Grupo	Porosidad (%)	Rango
H5	Con hormigas	38,50	1
H4	Con hormigas	42,26	2
P2	Control	42,64	3
P1	Control	43,01	4,5
H1	Con hormigas	43,01	4,5
H2	Con hormigas	43,40	6
H3	Con hormigas	43,77	7

De acuerdo con el ordenamiento de rangos presentado en la Tabla 11, la suma de rangos del grupo control fue R_C = 7,5. Por tanto

$$U_C = R_C - \frac{n_C(n_C + 1)}{2} = 7{,}5 - 3 = 4{,}5$$

$$U_H = n_C\, n_H - U_C = 10 - 4{,}5 = 5{,}5$$

$$U_{mín} = \text{mín}(U_C, U_H) = (4{,}5;5{,}5)$$

De las 21 asignaciones posibles, 19 fueron tan extremas o más extremas que la observada; por ello,

$$p \text{ exacto } \frac{19}{21} = 0{,}905$$

$$\delta = \frac{(5 - 4)}{10} = -0{,}10$$

Como p = 0,905 ≥ 0,05, no se rechaza H_0. Los rangos de ambos grupos se superponen ampliamente y no se identifica una dirección uniforme. Por ello, los resultados apoyan una interpretación de heterogeneidad local, pero no una modificación general de la porosidad atribuible a la presencia de hormigas (Frouz & Jílková, 2008; Cammeraat & Risch, 2008)

2.3 Estabilidad de agregados (%eaa)

El grupo control presentó 6,17 ± 2,96 % y una mediana de 6,17 %, mientras que el grupo con hormigas presentó 9,88 ± 3,64 % y una mediana de 10,87 %. La media fue 3,71 puntos porcentuales mayor en el grupo con hormigas, equivalente a un incremento descriptivo de 60,1 % respecto del control. Sin embargo, H3 registró 3,64 %, valor inferior al de ambos controles, dispuestos en la Tabla 12.

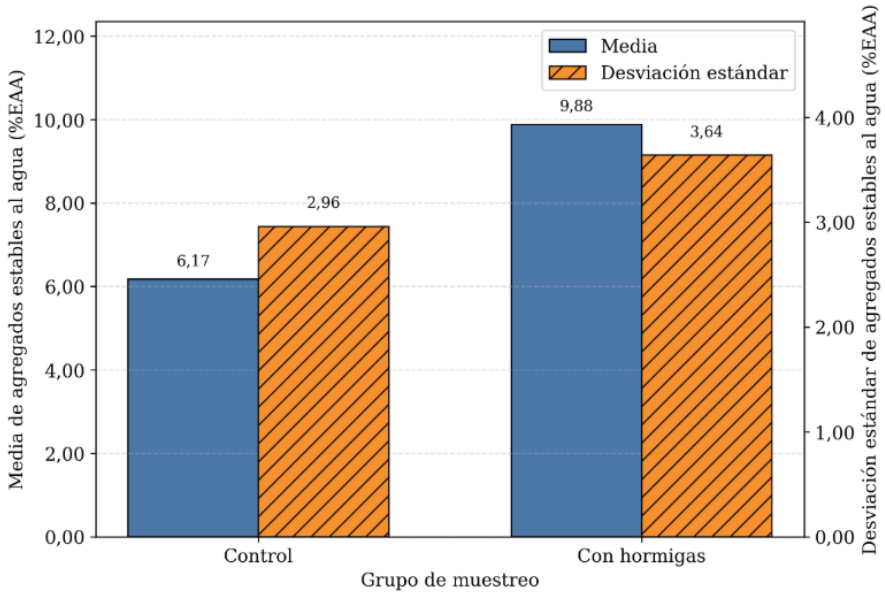
Tabla 12

Valores promedio de estabilidad de agregados (%) por grupo experimental

Grupo	n	Media (%)	Desviación estándar
Control	2	6.17	2.96
Con hormigas	5	9.88	3.69

Figura 11

Porcentaje promedio de agregados estables al agua (%EAA) y desviación estándar de los grupos control y con presencia de hormiga.



En la figura 11 se observa un incremento en el porcentaje de agregados estables al agua en zonas con presencia de hormigas. Esto sugiere una posible mejora en la resistencia estructural del suelo frente a la acción del agua.

Tabla 13

Ordenamiento y rangos del porcentaje de agregados estables al agua

Punto	Grupo	%EAA	Rango
H3	Con hormigas	3,64	1
P1	Control	4,08	2
P2	Control	8,26	3
H5	Con hormigas	10,63	4
H2	Con hormigas	10,87	5
H4	Con hormigas	11,01	6
H1	Con hormigas	13,23	7

Conforme al ordenamiento de rangos presentado en la Tabla 13, la suma de rangos del grupo control fue R_C = 5. Por tanto

$$U_C = R_C - \frac{n_C(n_C + 1)}{2} = 5 - 3 = 2$$

$$U_H = n_C\, n_H - U_C = 10 - 2 = 8$$

$$U_{mín} = \text{mín}(U_C, U_H) = (2,8)$$

De las 21 asignaciones posibles, 8 fueron tan extremas o más extremas que la observada; por ello,

$$p \text{ exacto } \frac{8}{21} = 0{,}381$$

$$\delta = \frac{(8 - 2)}{10} = 0{,}60$$

Como p = 0,381 ≥ 0,05, no se rechaza H_0. Aunque cuatro de los cinco puntos con hormigas presentaron valores superiores al control más alto, la presencia de H3 y el reducido número de controles impiden establecer una diferencia estadísticamente demostrable. El aumento del %EAA debe reportarse como la tendencia descriptiva más marcada del estudio (Cammeraat et al., 2002; Cammeraat & Risch, 2008).

Este resultado es coherente con lo planteado por (Ludwika Poreba 2025), quien destaca que la macrofauna edáfica puede modificar la estructura del suelo, favoreciendo procesos asociados a la estabilidad y funcionalidad física.

La diferencia relativa observada entre tratamientos fue del 60,1 %, constituyéndose en la mayor diferencia descriptiva registrada entre todas las propiedades físicas evaluadas.

La Figura 11 muestra que el grupo con presencia de hormigas presentó un valor promedio de estabilidad de agregados de 9,88 %, superior al observado en el grupo control (6,17 %). Aunque esta diferencia no resultó estadísticamente significativa (p > 0,05), la tendencia observada sugiere una posible influencia de la actividad bioturbadora sobre la estabilidad estructural del suelo. La amplitud de las barras de error refleja la variabilidad natural del sistema y la limitada cantidad de muestras disponibles, factores que reducen la potencia estadística del análisis. (Krzywinski & Altman, 2013).

2.4 Síntesis de la prueba exacta bilateral de mann- whitney u

La aplicación de la prueba exacta bilateral de Mann-Whitney U permitió evaluar la existencia de diferencias entre los grupos de estudio para las propiedades fisicoquímicas e hidrológicas suelo analizadas en el humedal el Charco -Oasis. Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 11, muestran que los valores de significancia exacta para la humedad gravimétrica (p = 0,381), la porosidad total (p = 0,905) y el porcentaje de estabilidad de agregados al agua (%EAA; p = 0,381) fueron superiores al nivel de significancia de 0,05. En consecuencia, no se rechazó la hipótesis nula en ninguno de las variables evaluadas, lo que indica que las diferencias observadas entre grupos no fueron estadísticamente significativas bajo las condiciones de muestreo y análisis del presente estudio. No obstante, este resultado no implica igualdad entre los grupos ni descarta posibles efectos asociados a la actividad de las hormigas, sino refleja que el tamaño muestral disponible no proporciono evidencia estadística suficiente para la confirmación de dichas diferencias.

Tabla 14

Resultados inferenciales por variable

Variable	U_C	U_H	$U_{mín}$	p exacto	δ	Decisión (α=0,05)
Humedad gravimétrica	8,0	2,0	2,0	0,381	−0,60	No se rechaza H_0
Porosidad total	4,5	5,5	4,5	0,905	0,10	No se rechaza H_0
%EAA	2,0	8,0	2,0	0,381	0,60	No se rechaza H_0

2.5 Interpretación integrada

Ninguna de las tres variables presentó $p < 0,05$. En consecuencia, la investigación no aporta evidencia inferencial suficiente para concluir que la presencia de hormigas arrieras produjo diferencias en la humedad gravimétrica, la porosidad total o el %EAA. Esta conclusión no significa que los grupos sean iguales ni que la bioturbación carezca de efecto; significa que el diseño y los datos disponibles no permiten demostrarlo estadísticamente (Wasserstein & Lazar, 2016; Greenland et al., 2016).

Los resultados descriptivos muestran tres patrones: la humedad media fue menor en los puntos con hormigas; la porosidad presentó amplia superposición y una mayor dispersión asociada principalmente a H5; y el %EAA fue mayor en cuatro de los cinco puntos con hormigas. Estos patrones son compatibles con modificaciones locales y heterogéneas del suelo, pero también pueden responder a variación espacial natural, condiciones microtopográficas, contenido de materia orgánica, humedad antecedente u otros factores no controlados (Cammeraat et al., 2002; Frouz & Jílková, 2008; Cammeraat & Risch, 2008).

El valor p expresa la proporción de asignaciones de grupo que producirían un resultado tan extremo o más extremo que el observado bajo H_0 y bajo los supuestos del análisis. No representa la probabilidad de que H_0 sea verdadera, no mide por sí solo la importancia ecológica de una diferencia y no permite establecer causalidad. Por esta razón, la interpretación combina los valores p con los datos individuales, los estadísticos descriptivos y la dirección del efecto δ (Wasserstein & Lazar, 2016; Greenland et al., 2016).

2.6 Alcance y limitaciones del análisis estadístico

La principal limitación es el tamaño muestral. Con $n_c = 2$ y $n_H = 5$ existen únicamente 21 asignaciones posibles de los grupos. En ausencia de empates, el menor valor p bilateral exacto que podría alcanzarse es 2/21 = 0,0952, incluso si los dos controles ocuparan los rangos más bajos o más altos. Por tanto, con este diseño era imposible alcanzar $p < 0,05$ mediante una prueba bilateral exacta. La ausencia de significancia era, en consecuencia, esperable y no debe emplearse como prueba de ausencia de diferencias (Ernst, 2004; Fay & Proschan, 2010).

También se asumió que los siete puntos constituyen observaciones independientes. Como todos pertenecen al mismo humedal, la cercanía espacial o la pertenencia a un mismo sistema de galerías podría generar dependencia entre observaciones y riesgo de pseudorreplicación. El estudio debe considerarse exploratorio y sus resultados no pueden generalizarse a otros humedales, especies de hormigas o épocas climáticas sin un muestreo adicional (Hurlbert, 1984).

Para aumentar la capacidad inferencial se recomienda ampliar y balancear el número de puntos control y con hormigas, incluir varios nidos espacialmente independientes, definir distancias de muestreo equivalentes, registrar covariables como humedad antecedente y materia orgánica, realizar campañas en diferentes periodos hidrológicos y verificar el cálculo del DMP a

partir de las masas retenidas en cada tamiz. Estas medidas reducen el riesgo de pseudorreplicación y permiten evaluar la variabilidad espacial y temporal reportada para los efectos de las hormigas sobre el suelo (Hurlbert, 1984; Frouz & Jílková, 2008; Cammeraat & Risch, 2008).

2.7 Conclusiones prueba estadística

La aplicación reproducible de la prueba exacta bilateral de Mann-Whitney U produjo $U_{\text{mín}} = 2{,}0;\ \text{p} = 0{,}381$ para humedad gravimétrica; $U_{\text{mín}} = 4{,}5;\ \text{p} = 0{,}905$ para porosidad total; y $U_{\text{mín}} = 2{,}0;\ \text{p} = 0{,}381$ para %EAA. En las tres variables no se rechazó la hipótesis nula H_0 al nivel de significancia $\alpha = 0{,}05$. La evidencia disponible permite describir tendencias locales, especialmente un mayor %EAA en la mayoría de los puntos con hormigas, pero no demostrar diferencias estadísticas ni relaciones causales.

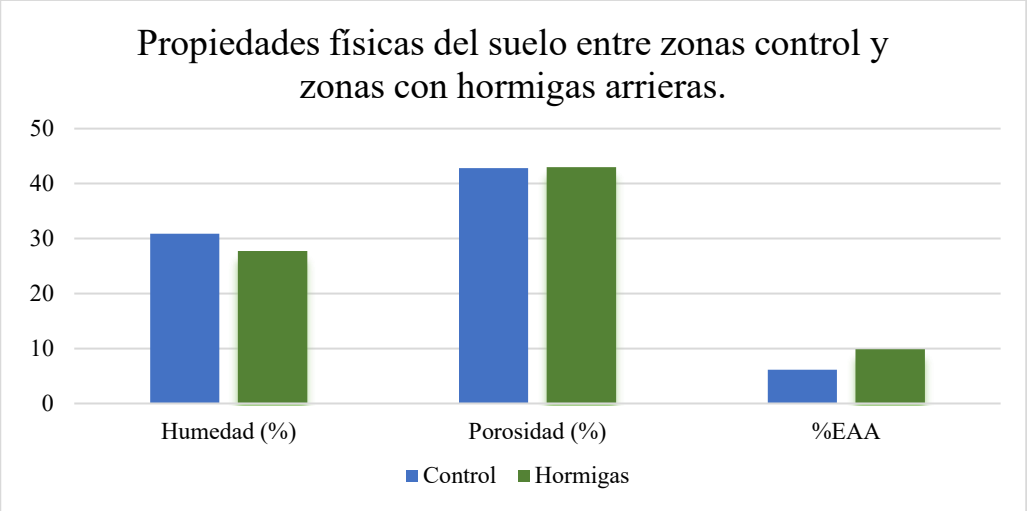
Los cálculos se fundamentan exclusivamente en los valores individuales de P1, P2 y H1-H5 consignados en las Tablas 2, 3 y 5. Los valores resumidos fueron recalculados para asegurar consistencia y trazabilidad.

En relación con la humedad gravimétrica, las zonas de control presentaron un valor promedio de 30,90 %, mientras que las zonas con presencia de hormigas registraron un promedio de 27,72 %. Las desviaciones estándar fueron de 2,55 para el grupo control y 4,92 para el grupo con hormigas, indicando que el grupo con hormigas tenía una mayor variabilidad y sugiere que la bioturbación puede estar relacionada con una redistribución más heterogénea del agua en el perfil del suelo, posiblemente ya que la bioturbación genera una serie de galerías biológicas y bio-poros que favorecen la infiltración y el drenaje interno. (Bottinelli et al., 2015). Los valores promedio de la porosidad fueron entre ambos grupos considerando porcentajes de 42,83 % para las zonas de control y 42,19 % para aquellas donde había presencia de hormigas , no obstante la separación estándar era con ampliación mayor en las zonas bio-turbadas (2,14) frente a 0,26), mostrando una mayor heterogeneidad estructural del suelo , este patrón se ajusta a la acción de los organismos edáficos que modifican localmente la distribución de los poros y alteran la dinámica del aire y el agua en el suelo. Los valores promedio que se obtuvieron para la estabilidad de agregados (%EAA) fueron de 6,17 % para los puntos de control y 9,88 % para las zonas con presencia de hormigas. Las desviaciones estándar fueron de 2,96 y 3,69 respectivamente.

Este aumento de la estabilidad estructural en las áreas con presencia de hormiga implicada sugiere que la actividad de las hormigas contribuiría a conformar agregados más resistentes a la acción del agua, probablemente debido a la mezcla de partículas minerales con materia orgánica o a la producción de estructuras cohesivas (Folgarait, 1998).

Figura 12

Comparación de las propiedades físicas del suelo entre zonas control y zonas con hormigas arrieras.



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en los análisis de humedad gravimétrica, porosidad total y porcentaje de agregados estables al agua (%EAA) realizados en muestras de suelo del humedal El Charco–Oasis. Los valores corresponden a las medias calculadas para los grupos control y con presencia de hormigas arrieras.

Esto sugiere que la bioturbación no genera un cambio uniforme, sino que induce una redistribución espacial de la porosidad, lo cual coincide con lo planteado por Tiago O. Ferreira (2024), quien indica que los procesos edáficos en humedales están controlados por interacciones físicas y biológicas que generan heterogeneidad estructural.

2.8 Comparación de los resultados con estudios previos

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias descriptivas entre las zonas con presencia de hormigas arrieras y las zonas de control, aunque dichas diferencias no alcanzaron significancia estadística. La interpretación de estas tendencias adquiere mayor relevancia al

contrastarlas con investigaciones previas sobre el papel de las hormigas como organismos modificadores de las propiedades físicas del suelo.

En relación con la humedad gravimétrica, las zonas con presencia de hormigas registraron un valor promedio de 27,72 %, mientras que las zonas de control presentaron un promedio de 30,90 %. Esta tendencia podría estar asociada a la presencia de galerías y cavidades construidas por las hormigas, las cuales favorecen la infiltración y redistribución del agua dentro del perfil edáfico. (Según Hillel 2003), la estructura y conectividad de los poros constituyen factores determinantes en los procesos de almacenamiento y movimiento del agua en el suelo. De manera similar, (Jabro y Stevens 2024) señalan que las modificaciones en la distribución del tamaño de poros pueden alterar significativamente la retención hídrica y el drenaje.

La comparación con antecedentes científicos debe realizarse como contraste cualitativo y no como equivalencia numérica directa, debido a que los estudios disponibles difieren en especie, profundidad de muestreo, tipo de suelo y variables analizadas. En el presente estudio, los puntos de control registraron una porosidad media de 42,83 %, mientras que los puntos con presencia visible de hormigas presentaron una media de 42,19 % y mayor dispersión, influida principalmente por H5. Este patrón no indica un aumento sistemático de la porosidad, sino una respuesta espacialmente heterogénea. Moutinho et al. (2003) reportaron que los nidos de Atta sexdens pueden generar menor densidad aparente y mayor macroporosidad en zonas influenciadas por galerías, lo cual es compatible con los valores relativamente mayores observados en H2 y H3. Por el contrario, Sousa et al. (2023) documentaron que las paredes de cámaras de nidos pueden presentar menor porosidad que la matriz del suelo circundante, interpretación compatible con el menor valor observado en H5. En conjunto, estos antecedentes respaldan que la actividad de las hormigas arrieras puede generar simultáneamente zonas con mayor conectividad de poros y sectores localmente densificados, lo que explica que la presencia de hormigas se relacione más con heterogeneidad espacial que con un cambio uniforme de la porosidad total.

La diferencia más notable se observó en el porcentaje de agregados estables al agua (%EAA), donde las zonas con presencia de hormigas alcanzaron un promedio de 9,88 %, mientras que las zonas de control registraron 6,17 %. Aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa, representa una tendencia consistente con la influencia de la macrofauna sobre la estabilidad estructural del suelo. (Frouz y Jílková 2008) indican que las hormigas contribuyen a la formación de agregados mediante la mezcla de partículas minerales y materia orgánica. Del mismo

modo, (Six et al. 2004) destacan que la estabilidad de agregados constituye un indicador fundamental de la calidad física del suelo y de la protección de la materia orgánica frente a procesos de degradación.

Los resultados obtenidos también son consistentes con los planteamientos de (Nascimento et al. 2024), quienes destacan que las hormigas arrieras desempeñan un papel frecuentemente subestimado en la evolución física y geomorfológica de los ecosistemas neotropicales. De igual manera, (Hansen et al. 2024) documentaron cambios en propiedades del subsuelo asociados a la actividad de hormigas constructoras de nidos, evidenciando su capacidad para modificar la estructura edáfica a diferentes escalas espaciales.

En conjunto, la comparación con estudios previos sugiere que las tendencias observadas en el humedal El Charco–Oasis son coherentes con los mecanismos de bioturbación descritos en la literatura científica. Aunque las diferencias observadas no fueron estadísticamente significativas, las tendencias descriptivas registradas son consistentes con los mecanismos de bioturbación reportadas en la literatura para la Hormiga Arriera. No obstante, debido al reducido tamaño muestral y ala carácter exploratorio del estudio, los resultados no permitieron confirmar una relación causal ni atribuir de manera concluyente las variaciones observadas a la actividad de las hormigas arrieras.

Conclusiones

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias descriptivas en algunas propiedades fisicoquímicas que la presencia de hormigas arrieras en el humedal El Charco–Oasis se encuentra asociada con modificaciones en algunas propiedades físicas e hidrológicas del suelo. No obstante, la prueba no paramétrica de Mann–Whitney U aplicada a las variables humedad gravimétrica, porosidad total y porcentaje de agregados estables al agua (%EAA) arrojó valores de significancia superiores al nivel crítico establecido ($p > 0,05$), por lo que no fue posible detectar diferencias estadísticamente significativas entre las zonas con y sin actividad bioturbadora. En consecuencia, los resultados deben interpretarse dentro del contexto de una investigación exploratoria, considerando la elevada complejidad de los ecosistemas de humedal, donde múltiples factores físicos, químicos y biológicos interactúan simultáneamente y pueden influir sobre las propiedades del suelo (Ferreira et al., 2024; Poreba et al., 2025).

En relación con la humedad gravimétrica, las zonas con presencia de hormigas registraron un valor promedio de 27,72 %, mientras que las zonas de control presentaron un promedio de 30,90 %, lo que representa una reducción aproximada del 10,3 %. Adicionalmente, las muestras asociadas a hormigas permiten identificar una tendencia con mayor variabilidad en el contenido de humedad. Esta tendencia sugiere que la construcción de galerías, cámaras subterráneas y bioporos puede favorecer procesos de infiltración, redistribución y drenaje del agua dentro del perfil edáfico. Dicho comportamiento es consistente con los planteamientos de (Hillel 2003) y (Jabro y Stevens 2024), quienes señalan que la estructura del suelo, la conectividad de los poros y la distribución de tamaños de poro son factores determinantes en la dinámica hídrica y en la capacidad de retención de agua.

Respecto a la porosidad total, los valores promedio obtenidos fueron muy similares entre tratamientos, con 42,83 % en las zonas de control y 42,19 % en las zonas con presencia de hormigas. Sin embargo, la mayor dispersión observada en las muestras bioturbadas observada una heterogeneidad estructural más marcada. Este resultado sugiere que la actividad de las hormigas no genera modificaciones uniformes en todo el sustrato, sino que produce cambios localizados que incrementan la variabilidad espacial de la red de poros. Este comportamiento coincide con lo reportado por Cammeraat y Risch (2008), Frouz y Jílková (2008) y Hansen et al. (2024), quienes documentan que la actividad excavadora de las hormigas modifica las propiedades físicas del suelo

a distintas escalas espaciales mediante procesos de remoción, mezcla y redistribución de materiales.

La diferencia descriptiva más importante se observó en el porcentaje de agregados estables al agua (%EAA). Las zonas con presencia de hormigas alcanzaron un promedio de 9,88 %, mientras que las zonas de control registraron 6,17 %, lo que representa un incremento aproximado del 60,1 %. Aunque esta diferencia no alcanzó significancia estadística, constituye una tendencia consistente con el papel de la macrofauna edáfica en la organización estructural del suelo. La formación y estabilización de agregados favorece la resistencia del suelo frente a procesos de erosión, compactación y degradación física. Estos resultados son coherentes con los planteamientos de Six et al. (2004), Lehmann et al. (2020), Frouz y Jílková (2008) y Nascimento et al. (2024), quienes destacan la importancia de la actividad biológica en la formación de agregados y en el mantenimiento de la calidad física del suelo.

El análisis textural evidenció el predominio de suelos franco-arcillosos en el área de estudio, indicando una relativa homogeneidad del material parental. Sin embargo, las diferencias puntuales observadas entre algunas muestras sugieren procesos locales de redistribución de partículas asociados a la actividad excavadora de las hormigas. Esta observación respalda la concepción del suelo como un sistema dinámico, complejo y autoorganizado, en el que las propiedades emergen de la interacción permanente entre componentes físicos, químicos y biológicos (Brady & Weil, 2017; Young & Crawford, 2004).

La integración de los resultados físicos, hidrológicos y texturales se interpretan como tendencias exploratorias que las hormigas arrieras desempeñan un papel funcional dentro del ecosistema del humedal El Charco–Oasis, contribuyendo a la generación de heterogeneidad estructural e hidrológica a escala local. Aunque las diferencias observadas no fueron estadísticamente significativas, las tendencias registradas en humedad, porosidad y estabilidad de agregados, junto con la evidencia reportada en la literatura científica, respaldan su consideración como organismos ingenieros del ecosistema capaces de intervenir en procesos relacionados con la aireación, infiltración, redistribución del agua, estabilidad estructural y mantenimiento de servicios ecosistémicos del suelo (Lavelle & Spain, 2001; Blanco-Canqui & Lal, 2008; Nascimento et al., 2024).

Por lo tanto, esta investigación constituye una línea base para la comprensión de las relaciones entre hormigas arrieras, propiedades físicas del suelo y servicios ecosistémicos en

humedales urbanos. Los resultados obtenidos resaltan la necesidad de desarrollar estudios futuros con un mayor número de unidades de muestreo, réplicas espaciales y evaluaciones temporales que permitan incrementar la potencia estadística de los análisis y determinar con mayor precisión la magnitud de la influencia de las hormigas arrieras sobre la dinámica edáfica. Asimismo, estos estudios contribuirán a fortalecer el conocimiento sobre la conservación y manejo sostenible de los humedales urbanos como ecosistemas estratégicos para la provisión de servicios ecosistémicos (Campos et al., 2024; Martín Muñoz et al., 2024; Rojas Quezada et al., 2026).

Referencias

Agrosavia. (2018). *Guía para la toma de muestras de suelo para análisis químicos y físicos (GA-G-17)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. En A. Klute (Ed.), Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods (2.ª ed., Agronomy Monograph No. 9, pp. 363–375). American Society of Agronomy; *Soil Science Society of America*. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13

Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2008). Principles of soil conservation and management. Springer.

Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., & Peng, X. (2015). Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Research,* 146, 118–124. https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007

Cammeraat, E. L. H., & Risch, A. C. (2008). The impact of ants on mineral soil properties and processes at different spatial scales. *Journal of Applied Entomology,* 132(4), 285–294. https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2007.01281.x

Cammeraat, L. H., Willott, S. J., Compton, S. G., & Incoll, L. D. (2002). The effects of ants' nests on the physical, chemical and hydrological properties of a rangeland soil in semi-arid Spain. *Geoderma*, 105(1–2), 1–20. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00085-4

Campos, C. O., Almeida, S. F. P., Serra, S. R. Q., Calapez, A. R., Silveira, P., & Feio, M. J. (2024). The overlooked margins: How cities impact diversity of plants and terrestrial invertebrates along urban streams. *Urban Ecosystems,* 27(5), 1751–1766. https://doi.org/10.1007/s11252-024-01551-z

Cock, J. H., Álvarez Villada, D. M., & Estrada Iza, M. (2010). *RASTA Rapid Soil and Terrain Assessment: Guía práctica para la caracterización del suelo y del terreno* (Versión 2). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Corporación Biotec.

Cliff, N. (1993). Dominance statistics: Ordinal analyses to answer ordinal questions. *Psychological Bulletin,* 114(3), 494–509. https://doi.org/10.1037/0033-2909.114.3.494

Danielson, R. E., & Sutherland, P. L. (1986). Porosity. En A. Klute (Ed.), Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods (2.ª ed., Agronomy Monograph (9), 443–461. American Society of Agronomy; *Soil Science Society of America*. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c18

Díaz-Pinzón, L., Sierra, L., Trillas, F., & Herrera, L. (2025). The socio-cultural value of urban wetlands: Insights into local sustainable management. *Journal of Environmental Management,* 395, Article 127933. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127933

Ernst, M. D. (2004). Permutation methods: A basis for exact inference. *Statistical Science*, 19(4), 676–685. https://doi.org/10.1214/088342304000000396

Fay, M. P., & Proschan, M. A. (2010). Wilcoxon–Mann–Whitney or t-test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules. *Statistics Surveys*, 4, 1–39. https://doi.org/10.1214/09-SS051

Ferreira, T. O., Queiroz, H. M., Ruiz, F., Nóbrega, G. N., Cherubin, M. R., de Souza Júnior, V. S., Barcellos, D., Ferreira, A. D., & Otero, X. L. (2024). How do soil processes control the provision of ecosystem services in coastal wetlands? *Environmental Research*, 255, 119078. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119078

Folgarait, P. J. (1998). Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: *A review. Biodiversity and Conservation,* 7(9), 1221–1244. https://doi.org/10.1023/A:1008891901953

Frouz, J., & Jílková, V. (2008). The effect of ants on soil properties and processes (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News,* 11, 191–199. https://doi.org/10.25849/myrmecol.news_011:191

Gardner, W. H. (1986). Water content. En A. Klute (Ed.*), Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2.ª ed), Agronomy Monograph No. 9, (pp.493–544). American Society of Agronomy; Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c21

Greenland, S., Senn, S. J., Rothman, K. J., Carlin, J. B., Poole, C., Goodman, S. N., & Altman, D. G. (2016). Statistical tests, P values, confidence intervals, and power: A guide to misinterpretations. European *Journal of Epidemiology,* 31(4), 337–350. https://doi.org/10.1007/s10654-016-0149-3

Hansen, R. R., Kristiansen, S. M., Damgaard, C. F., & Offenberg, J. (2024). Effects of ant mounds (Formica exsecta) on subsoil properties in a heathland. European *Journal of Soil Biology*, 120, 103597. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103597

Hillel, D. (2003). *Introduction to environmental soil physics*. Academic Press.

Hollander, M., Wolfe, D. A., & Chicken, E. (2014). *Nonparametric statistical methods* (3rd ed.). Wiley.

Hurlbert, S. H. (1984). Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs,* 54(2), 187–211. https://doi.org/10.2307/1942661

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2023). *Análisis de muestras en el Laboratorio Nacional de Suelos.* IGAC. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/pc-agr-01_v2_analisis_de_muestras_en_el_laboratorio_nacional_de_suelos.pdf

Jabro, J. D., Stevens, W. B., Iversen, W. M., Sainju, U. M., Allen, B. L., Dangi, S., & Chen, C. (2024). Soil-water retention curves and pore-size distribution in a clay loam under different tillage systems. *Land,* 13(12), 1987. https://doi.org/10.3390/land13121987

Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994). Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 69(3), 373–386. https://doi.org/10.2307/3545850

Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlöf, J., Lavelle, P., & Lepage, M. (2006). Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology,* 32(2), 153–164. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.07.004

Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2.ª ed., Agronomy Monograph No. 9, pp. 425–442). American Society of Agronomy; Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17

Krzywinski, M., & Altman, N. (2013). Power and sample size. *Nature Methods*, 10, 1139–1140. https://doi.org/10.1038/nmeth.2738

Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001). *Soil ecology. Kluwer* Academic Publishers.

Lehmann, J., Hansel, C. M., Kaiser, C., Kleber, M., Maher, K., Manzoni, S., Nunan, N., Reichstein, M., Schimel, J. P., Torn, M. S., Wieder, W. R., & Kögel-Knabner, I. (2020). Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience*, 13(8), 529–534. https://doi.org/10.1038/s41561-020-0612-3

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60. https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491

Martín Muñoz, S., Schoelynck, J., Tetzlaff, D., Debbaut, R., Warter, M., & Staes, J. (2024). Assessing biodiversity and regulatory ecosystem services in urban water bodies which serve as aqua-nature-based solutions. *Frontiers in Environmental Science,* 11, 1304347. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1304347

Moutinho, P., Nepstad, D. C., & Davidson, E. A. (2003). Influence of leaf-cutting ant nests on secondary forest growth and soil properties in Amazonia. *Ecology*, 84(5), 1265–1276. https://doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084[1265:IOLANO]2.0.CO;2

Nascimento, D. L., Chiapini, M., Vidal-Torrado, P., Phillips, J. D., Bernardes Ladeira, F. S., Terra Machado, D. F., Camargo, R. S., & Valezio, E. V. (2024). The underestimated role of leaf-cutting ants in soil and geomorphological development in neotropical America. *Earth-Science Reviews,* 248, 104650. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104650

Nist/Sematech. (2012). *e-Handbook of statistical methods*. National Institute of Standards and Technology. https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/

Niño Camacho, C y Romero Puentes R. (2026). Relación entre hormigas arrieras y servicios ecosistémicos del suelo en el humedal El Charco-Oasis, Villavicencio, Meta *[Documento de Trabajo Proyecto FODEIN, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional.* http://hdl.handle.net/11634/72382

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2011, 17 de junio). *Parque ecológico humedal Charco Oasis.* https://runap.parquesnacionales.gov.co/area-protegida/403

Poręba, L., Głowienka, E., & Siebielec, G. (2026). Soil ecosystem services in urban areas and methods for their assessment using remote sensing. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1734143. https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1734143

Rojas Quezada, C., Páez, A., de la Fuente, H., & Castillo, B. (2026). Grounding urban wetlands as nature-based solutions: Enhancing accessibility to nature in Concepción, Chile. *npj Urban Sustainability*, 6, 32. https://doi.org/10.1038/s42949-026-00339-8

Secretariat of the Convention on Biological Diversity. (2020). *Global biodiversity outlook 5.* Convention on Biological Diversity. https://www.cbd.int/gbo5

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7–31. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008

Sousa, K. K. A., Camargo, R. S., Caldato, N., Farias, A. P., Matos, C. A. O., Zanuncio, J. C., Sabattini, J. A., & Forti, L. C. (2023). Soil micromorphology and CO_2 exchange in initial Atta sexdens (Hymenoptera: Formicidae) nests. *International Journal of Tropical Insect Science*, 43, 971–977. https://doi.org/10.1007/s42690-023-01009-3

Triola, M. F. (2018). *Estadística* (12.ª ed.). Pearson Educación.

Wasserstein, R. L., & Lazar, N. A. (2016). The ASA's statement on p-values: Context, process, and purpose. *The American Statistician*, 70(2), 129–133. https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108

Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.

Young, I. M., & Crawford, J. W. (2004). Interactions and self-organization in the soil–microbe complex. *Science*, 304(5677), 1634–1637. https://doi.org/10.1126/science.1097394

Anexos

Resultados registrados en DMP (Diámetro Medio Ponderado)

Muestra control P1					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Fracción (wi)	xi*wi	xi (mm)
#4	6,2	4,89	0,100020454	0,93019	9,3
#10	12,4	12,22	0,249948865	3,299325	13,2
#20	14	14,67	0,300061362	3,615739	12,05
#40	10,1	9,78	0,200040908	1,719352	8,595
#60	7,09	7,33	0,149928411	0,531496	3,545
Peso total (g)		48,89	DMP (Estabilidad de agregados)	10,0961	

Muestra control P2					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Fracción (wi)	xi*wi	xi (mm)
#4	6,2	4,432	0,100009026	0,930084	9,3
#10	12,4	8,863	0,199995487	2,63994	13,2
#20	14	13,295	0,300004513	3,615054	12,05
#40	10,1	11,079	0,25	2,14875	8,595
#60	7,09	6,647	0,149990974	0,531718	3,545
Peso total (g)	44,316	DMP (Estabilidad de agregados)	9,865546755		

Muestra H1					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Fracción (wi)	xi*wi	xi (mm)
#4	6,2	1,324	0,1	0,93	9,3
#10	12,4	2,648	0,2	2,64	13,2
#20	14	3,972	0,3	3,615	12,05
#40	10,1	3,31	0,25	2,14875	8,595
#60	7,09	1,986	0,15	0,53175	3,545
Peso total (g)	13,24	DMP (Estabilidad de agregados)	9,8655		

Muestra H2					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Fracción (wi)	xi*wi	xi (mm)
#4	6,2	4,939	0,099997975	0,929981	9,3

#10	12,4	9,878	0,199995951	2,639947	13,2
#20	14	14,817	0,299993926	3,614927	12,05
#40	10,1	12,348	0,250005062	2,148794	8,595
#60	7,09	7,409	0,150007086	0,531775	3,545
Peso total (g)	49,391	DMP (Estabilidad de agregados)	9,865423154		

Muestra H3					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Fracción (wi)	xi*wi	xi (mm)
#4	6,2	2,694	0,1	0,93	9,3
#10	12,4	5,388	0,2	2,64	13,2
#20	14	8,082	0,3	3,615	12,05
#40	10,1	6,735	0,25	2,14875	8,595
#60	7,09	4,041	0,15	0,53175	3,545
Peso total (g)	26,94	DMP (Estabilidad de agregados)	9,8655		

Muestra H4					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Fracción (wi)	xi*wi	xi (mm)
#4	6,2	4,841	0,1000062	0,930058	9,3
#10	12,4	9,681	0,19999174	2,639891	13,2
#20	14	14,522	0,29999793	3,614975	12,05
#40	10,1	12,102	0,25000516	2,148794	8,595
#60	7,09	7,261	0,14999897	0,531746	3,545
Peso total (g)	48,407	DMP (Estabilidad de agregados)	9,865464396		

Muestra H5					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso retenido (g)	Fracción (wi)	xi*wi	xi (mm)
#4	6,2	3,67	0,09999183	0,929924	9,3
#10	12,4	7,341	0,2000109	2,640144	13,2
#20	14	11,011	0,30000272	3,615033	12,05
#40	10,1	9,176	0,25000681	2,148809	8,595
#60	7,09	5,505	0,14998774	0,531707	3,545
Peso total (g)	36,703	DMP (Estabilidad de agregados)	9,865615753		