



Fecha de recibido: 26-02-2023

Fecha de aceptado: 28-07-2023

DOI: 10.22490/21456453.6681

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA ZONA DE TRANSICIÓN ACUÁTICO TERRESTRE DE UN HUMEDAL TROPICAL (AYAPEL-COLOMBIA)

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE AQUATIC-TERRESTRIAL TRANSITION ZONE OF A TROPICAL WETLAND (AYAPEL-COLOMBIA)

Maria Díaz-Mesa,¹ Esnedy Hernández,² Diana M. Agudelo,³ Nora E. Villegas,⁴ Gabriel A. Agudelo,⁵ Sergio E. Herazo,⁶ Lina Berrouet,⁷ Laura M. Lozano,⁸ Natalia Espinosa,⁹ Yarin T. Puerta,¹⁰ Fabio D.J. Vélez,¹¹ Néstor J. Aguirre,¹² Mario A. Quijano-Abril,¹³ José M. Rojas-Villa,¹⁴ Daniela Cardona,¹⁵ Daniela Salazar,¹⁶ Álvaro Wills¹⁷

¹ MSc en Ingeniería Ambiental, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. camila.diaz@udea.edu.co, ² PhD Biología, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. esnedy.hernandez@udea.edu.co, ³ PhD Ingeniería Ambiental, Grupo de Investigación, Ingeniería, Ciencias Ambientales e Innovación, Fundación Universitaria Católica del Norte, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. diana.agudelo@udea.edu.co, ⁴ MSc en Ingeniería Ambiental, Grupo GAIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. nora.villegas@udea.edu.co, ⁵ MSc en Ingeniería Ambiental, Grupo GAIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. gabriel.agudelo@udea.edu.co, ⁶ MSc en Ingeniería Ambiental, Grupo Ecología Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. sergio.herazo@udea.edu.co, ⁷ PhD en Ingeniería - Recursos Hidráulicos, Grupo Ecología Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. maria.berrouet@udea.edu.co, ⁸ Ingeniera Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. lauram.lozano@udea.edu.co, ⁹ Ingeniera Ambiental, Estudiante Maestría en Ingeniería Ambiental, Grupo Ecología Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. natalia.espinosa@udea.edu.co, ¹⁰ MSc Ecosistemas acuáticos, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. yarin.puerta@udea.edu.co, ¹¹ Dr. Phil. (philosophische Fakultät), Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. fabio.velez@udea.edu.co, ¹² Dr.rer.nat., Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. nestor.aguirre@udea.edu.co, ¹³ PhD Biología, Grupo Estudios Florísticos, Facultad de Ingenierías, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia. maquijano@uco.edu.co, ¹⁴ Agrónomo, Estudiante Maestría en Biología, Grupo Estudios Florísticos, Facultad de Ingenierías, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia. miguel.rojas4@udea.edu.co, ¹⁵ Ingeniera Ambiental, Estudiante Maestría en Ingeniería Ambiental, Grupo Estudios Florísticos, Facultad de Ingenierías, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia. daniela.cardona8959@uco.net.co, ¹⁶ MSc en Restauración Ecológica, Grupo Estudios Florísticos, Facultad de Ingenierías, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia. da.salazar@javeriana.edu.co, ¹⁷ MSc Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Grupo GAIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. alvaro.wills@udea.edu.co

Citación: Díaz-Mesa, M., Hernández, E., Agudelo, D., Villegas, N., Agudelo, G., Herazo, S., Berrouet, L., Lozano, L., Espinosa, N., Puerta, Y., Vélez, F., Aguirre, N., Quijano-Abril, M., Rojas-Villa, J., Cardona, D., Salazar, D. y Wills, A. (2024). Caracterización fisicoquímica de la zona de transición acuático terrestre de un humedal tropical (Ayapel-Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 181-210. <https://doi.org/10.22490/21456453.6681>

RESUMEN

Contextualización: la zona de transición acuático terrestre (ZTAT) en la planicie de inundación (llanura aluvial) Ramsar Ayapel (Colombia), permanece inundada más de la mitad de un año y su franja litoral genera una fuerte influencia en el ecosistema. Una aproximación a la caracterización espacial y temporal de esta zona es fundamental para un posterior análisis funcional, especialmente cuando, a excepción de algunos ecosistemas amazónicos, las planicies de inundación tropical son poco exploradas.

Vacío de conocimiento: la dinámica de las planicies de inundación está regulada principalmente por los pulsos de inundación, que influyen directamente en las condiciones físicas y químicas del agua y el sedimento; por lo anterior, la biota presenta adaptaciones a las condiciones de inundación y anegamiento del ecosistema. Sin embargo, las investigaciones han abordado la fase terrestre y acuática como sistemas separados, haciéndose necesario acudir a metodologías que evidencien la conectividad en el sistema y faciliten la interpretación de factores claves en el funcionamiento ecológico en los humedales tropicales.

Propósito: la investigación analizó la estructura y el funcionamiento de la ZTAT a través de variables físicas y químicas en diferentes momentos del pulso de inundación.

Metodología: en dos humedales del complejo cenagoso, sensibles al pulso de inundación, se realizaron tres muestreos: aguas en ascenso (julio de 2021); aguas altas (septiembre de 2021); y aguas en descenso (marzo de 2022). Se monitoreó la ZTAT delimitándola en cuatro subzonas: agua, sedimentos, suelo inundable y suelo.

Resultados y conclusiones: se revelaron cambios significativos en el tiempo asociados al nivel del agua y a las concentraciones de nitrógeno; mientras en el espacio, asistido por el contraste de la ZTAT en los dos sitios, se reflejaron diferencias a través de las variables *in situ* y las características del suelo. Se detectó que la profundidad, transparencia y una mayor concentración de formas de nitrógeno y algunos iones como aluminio y magnesio generaron diferencias a nivel temporal; mientras la conductividad, concentración del calcio y variables asociadas a las características del suelo lo expresaron a nivel espacial gracias a la exploración de la ZTAT; por tanto, la dinámica fisicoquímica de momentos y sitios en un humedal requiere un diseño de muestreo que por medio de la ZTAT facilita la escala de análisis fisicoquímico.

Palabras clave: hidrología, humedal, llanura aluvial, Ramsar.

ABSTRACT

Contextualization: The aquatic-terrestrial transition zone (ZTAT) in the floodplain (alluvial plain) Ramsar Ayapel (Colombia) remains flooded for more than half of the year, and its coastal strip generates a strong influence on the ecosystem. An approach to the spatial and temporal characterization of this zone is crucial for further functional analysis, especially when tropical floodplains are little explored except for some Amazonian ecosystems.

Knowledge gap: Floodplain dynamics are mainly regulated by flood pulses, directly influencing the physical and chemical conditions of water and sediment. Therefore, the biota is adapted to the flooding and waterlogging conditions of the ecosystem. However, research has addressed the terrestrial and aquatic phases as separate systems, making it necessary to resort to methodologies that demonstrate connectivity in the system and facilitate the interpretation of key factors in the ecological functioning of tropical wetlands.

Purpose: The research analyzed the structure and functioning of the ZTAT through physical and chemical variables at different times of the flood pulse.

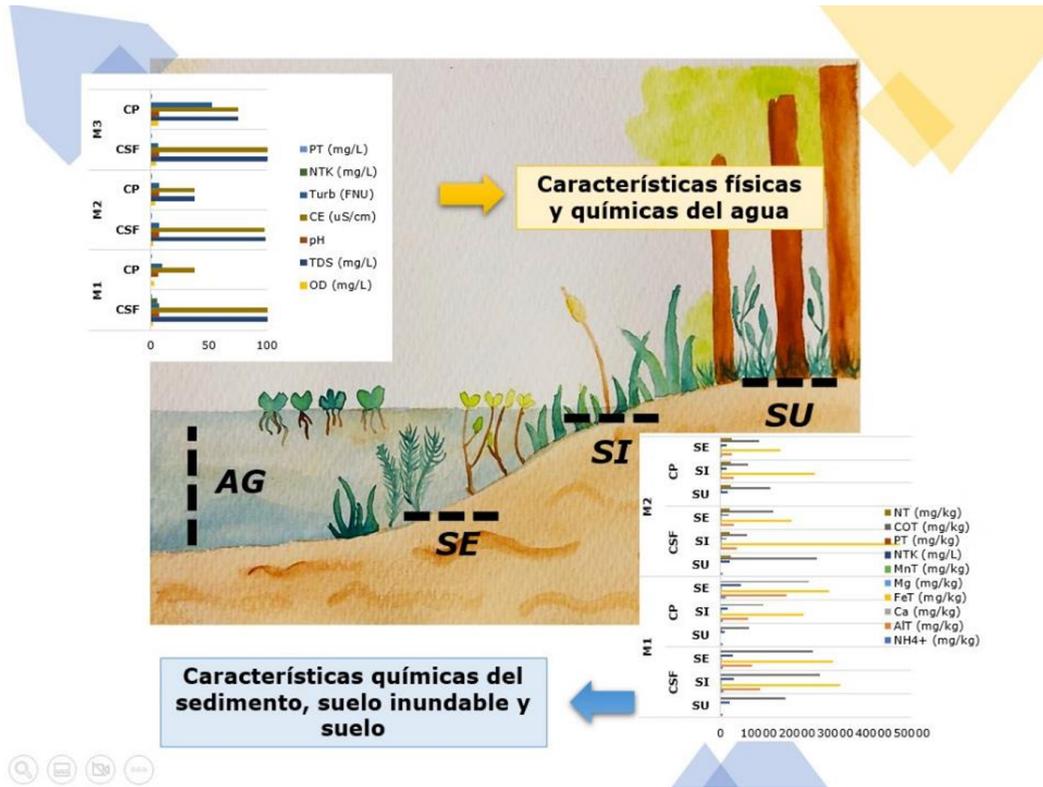
Methodology: In two wetlands of the muddy complex, sensitive to the flood

pulse, three samplings were carried out: rising water (July 2021), high water (September/2021), and declining water (March/2022). The ZTAT was monitored by delimiting it into four subzones: water, sediments, floodable soil, and soil.

Results and conclusions: Significant changes in time associated with water level and nitrogen concentrations were revealed; while in space, assisted by the contrast of the ZTAT at the two sites, differences were reflected through *in situ* variables and soil characteristics. It was detected that depth, transparency, and a higher concentration of nitrogen forms, and some ions such as aluminum and magnesium generated differences on a time level. On the contrary, conductivity, calcium concentration, and variables associated with soil characteristics expressed it at the spatial level due to exploring the ZTAT. Therefore, the physicochemical dynamics of moments and sites in a wetland require a sampling design that, using the ZTAT, facilitates the scale of physicochemical analysis.

Keywords: Hydrology, floodplain, Ramsar, wetland.

RESUMEN GRÁFICO



Nota: M1: julio de 2021, aguas en ascenso. M2: septiembre de 2021, aguas altas. M3: marzo de 2022, aguas en descenso. CSF: ciénaga San Francisco, CP: ciénaga Patícos, AG: Agua, SE: sedimento, SI: suelo inundable y SU: suelo.

Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de planicies de inundación conocidos también como humedales de ribera se caracterizan por régimen de flujo variable en intensidad, duración y número de inundaciones (Mitsch *et al.*, 2015). Históricamente los humedales han tenido un importante papel para la huma-

nidad, determinando el hábitat, la cultura y diversas posibilidades de desarrollo a través del suministro de diferentes tipos de recursos (Reid, 2005). Debido a esa relación entre los humedales y la sociedad, y teniendo en consideración que la desaparición de humedales es más rápida que la

experimentada por otros ecosistemas (Darrah *et al.*, 2019; Gardner and Finlayson, 2018; Let and Pal, 2023; Shafi *et al.*, 2023), su análisis y gestión debe generar directrices acertadas para afrontar la degradación, cambios en el uso del suelo, ganadería, minería, extracción de agua, eutrofización, sobreexplotación, introducción de especies exóticas invasoras y cambio ambiental global (Mori *et al.*, 2019).

Colombia es un país con diversos tipos de humedales, su topografía heterogénea y ubicación en el trópico propician condiciones climáticas particulares que generan diferentes ambientes y escenarios dinámicos que representan zonas riparias y terrestres en una contrastante y compleja zonificación (Ricaurte *et al.*, 2019). Evidenciar la conectividad en el sistema y facilitar la interpretación de factores claves en el funcionamiento, es posible desde el estudio de los ecotonos y la transición acuático terrestre se encuentra enmarcada como uno en una planicie de inundación (Dgebuadze and Gladyshev, 2016). Según el concepto moderno, los ecotonos se definen como zonas de tránsito entre sistemas ecológicos adyacentes que tienen un conjunto de características determinadas únicamente por escalas espaciales, temporales y fuerzas de interacción entre estos sistemas adyacentes (Junk *et al.*, 2013).

En las planicies de inundación el ambiente donde la tierra y el agua están co-

nectados por una frontera móvil y regida por el nivel del agua, el ecotono es llamado Zona de Interfaz o Transición Acuático Terrestre (ZITAT o ZTAT). Caracterizarla debe incluir el pulso de inundación, principal fuerza que controla la dinámica y los procesos en la ZIAT (Junk *et al.*, 2020; Kayler *et al.*, 2019).

La ZTAT en el sistema Ramsar Ayapel en Colombia, está constituida por una franja aproximada de 7000 ha, que permanecen inundadas casi ocho meses del año, con profundidades variables entre cero y 3.5 m (Zabala *et al.*, 2019). Durante este periodo, la franja litoral genera una fuerte influencia en el ecosistema, lo que en primera instancia requiere la caracterización espacial y temporal de variables fisicoquímicas considerando la Zona de Transición Acuático Terrestre.

A excepción de algunos ecosistemas amazónicos (Junk *et al.*, 2012, 2020; Kayler *et al.*, 2019; Ricaurte *et al.*, 2019), las evaluaciones de las planicies de inundación tropical no han sido abordadas a través de la caracterización de una ZIAT, objetivo de este trabajo. Este enfoque percibe la conectividad como el flujo genético y energético, ya que transfieren subsidios biogeoquímicos y biológicos que cambian en el tiempo, retos de la visión y gestión de humedales RAMSAR.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema de estudio

La ciénaga de Ayapel (Córdoba-Colombia) (Figura 1B), declarada humedal RAMSAR en el año 2018 (Puerta *et al.* 2016), pertenece a la cuenca del río San Jorge en la región Caribe, al norte de Colombia. El sistema cenagoso de Ayapel cuenta con una extensión aproximada de 1504 km² y con elevaciones entre los 20 y 150 m.s.n.m. De acuerdo con la clasificación de Holdridge, la ciénaga se asocia a una zona de vida de bosque húmedo tropical, con promedio anual de lluvias entre 2000 mm y 2500 mm y temperatura ambiente promedio anual superior a los 25 °C (Zabala *et al.* 2019).

Para la elección de los sitios de muestreo se tuvieron en cuenta criterios como: contrastes entre la geología, geomorfo-

logía y uso del suelo. Se buscaron sitios sensibles al pulso de inundación y que estuvieran incluidos en el polígono Ramsar. Los sitios se establecieron en los cuerpos de agua llamados Patícos (CP) (8° 20' 3.20" N, 75° 8' 3.95" W) a 29 m.s.n.m. y San Francisco (CSF) (8° 17' 0.65" N y 75° 2' 13.37" W) a 33 m.s.n.m., ubicados en los costados occidente y suroriente, respectivamente (Figura 1C). Estos sitios se localizan en una geomorfología de ambiente fluvial, con geoformas originadas a partir de procesos de erosión de las corrientes y acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas. Dicha geomorfología se analizó a través de la plancha GmfMM73 provista por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Figura 1C).

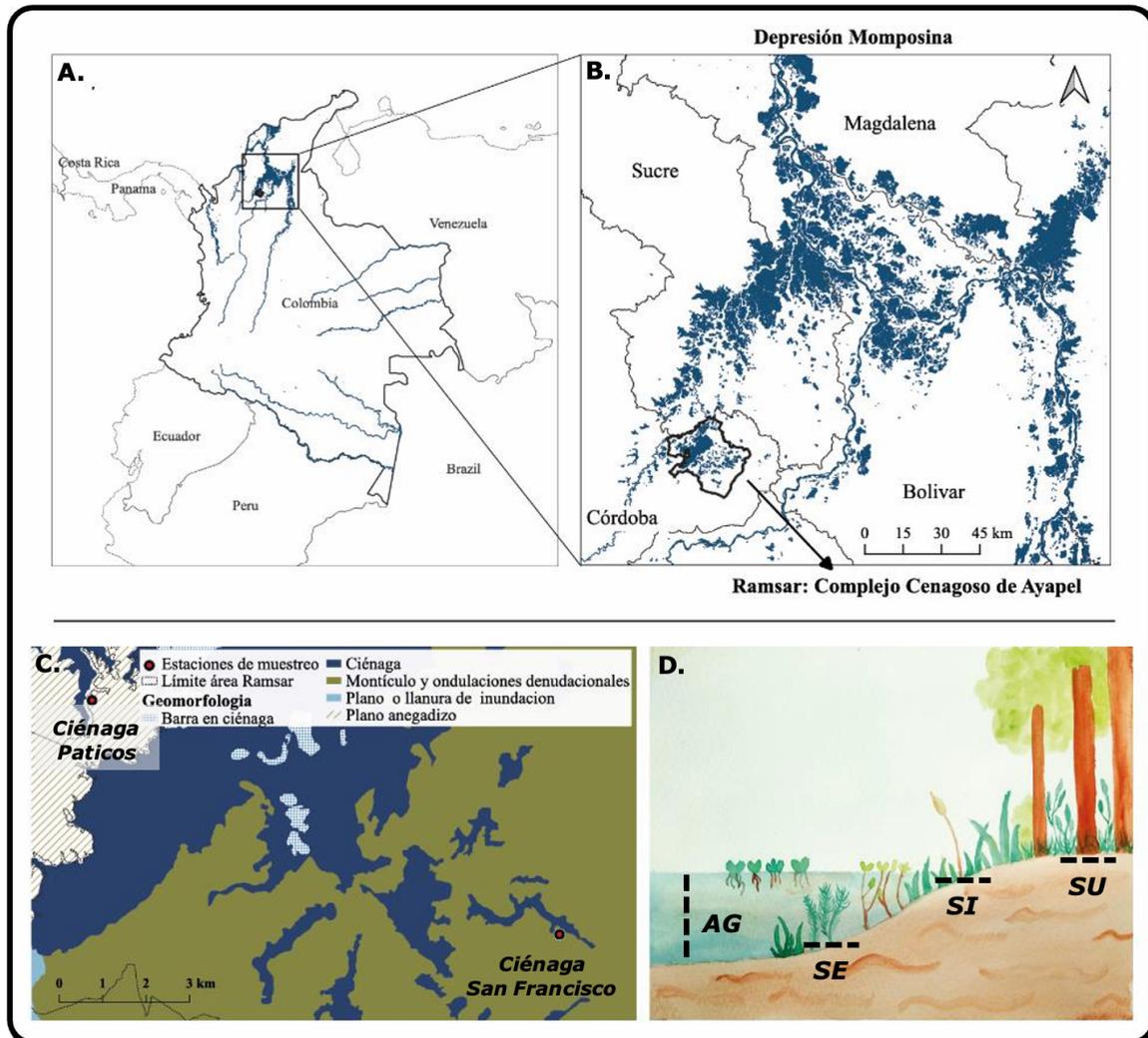


Figura 1. A. Ubicación país Colombia en Sudamérica. B. Ubicación de la zona de estudio (Ciénaga de Ayapel- Córdoba, Colombia), C. Clasificación geológica, geomorfológica y D. zonificación de muestreo considerada en la transición acuático terrestre: **AG:** Agua, **SE:** sedimento, **SI:** suelo inundable y **SU:** suelo.

Fuente: autores.

Diseño de muestreo

La ZTAT se muestreó en tres momentos (Mtv) del pulso hidrológico: 1: aguas en ascenso (julio de 2021), 2: aguas altas (sep-

tiembre de 2021) y 3: aguas en descenso (marzo de 2022) (Figura 2A). En la Figura 2 se presentan las características hidrológicas de cada una de estas campañas, se observan los niveles de inundación dia-

rios (en cm) medidos por la estación limnográfica (EL) BEIRUT-AUT [25027760] (8°18'08.0" N, 75°08'02.0" W) asociada al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM de Colombia (Figura 2A). Además, se presenta la precipitación (en mm/mes) para la región

a partir de la base de datos Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) v2.0 (Figura 2C); y se muestran las imágenes satelitales en épocas cercanas a las campañas de muestreo obtenidas a través del programa Sentinel 2 (Figura 2B).

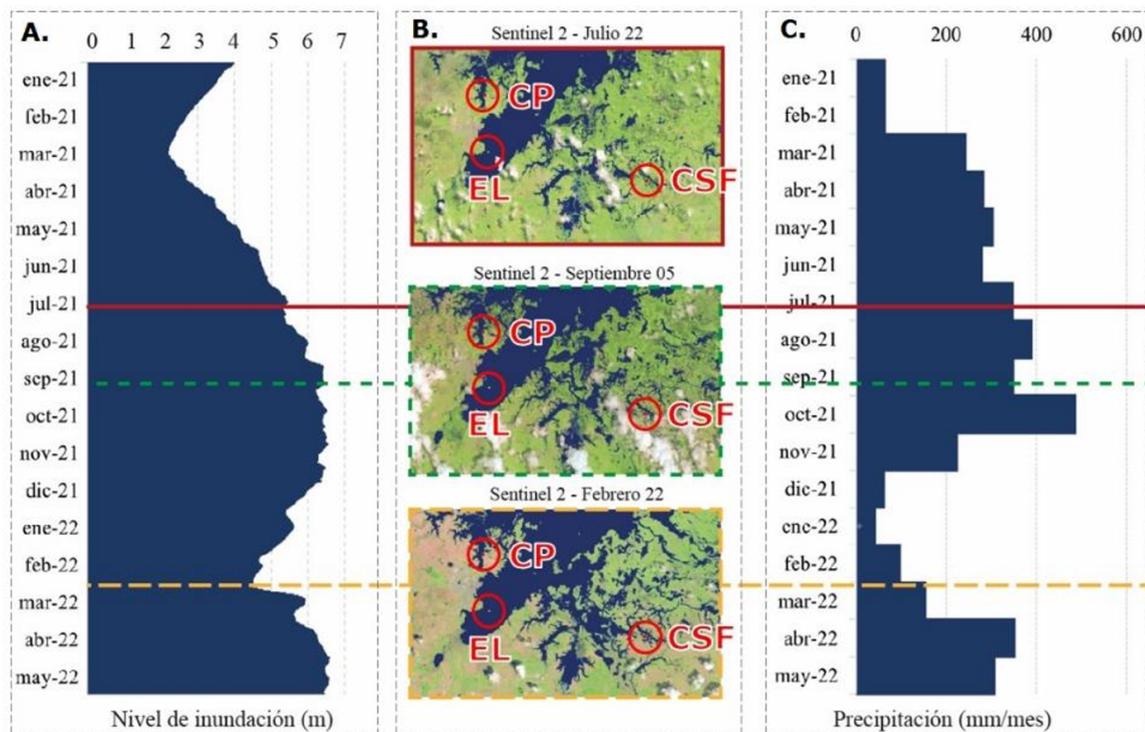


Figura 2. Características hidrológicas en los tres muestreos realizados. **A.** Nivel de inundación (m) estación limnográfica (EL) BEIRUT - AUT [25027760] del IDEAM (8°18'08.0" N, 75°08'02.0" W). **B.** Imágenes satelitales lugares de muestreo. **C.** Datos de precipitación (mm/mes) base de datos Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) v2.0. Imágenes Satelitales Sentinel 2. **Donde:** Línea continua roja: julio de 2021, línea punteado corto verde: septiembre de 2021 y línea punteado largo naranja: marzo de 2022. En las imágenes satelitales: **CP:** ciénaga Paticos, **CSF:** ciénaga San Francisco.

Fuente: autores.

El muestreo se realizó en cuatro Zonas de la transición acuático terrestre: agua (AG), sedimentos (SE), suelo inundable (SI) y suelo (SU) (Figura 1D). El análisis del agua incluyó las medidas *in situ* de transparencia y profundidad (con disco Secchi); temperatura (T_{AG}), conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), oxígeno disuelto (OD), pH (medidas con multiparamétrico HACH HQ40d), y turbidez (Turb) (con un turbidímetro HACH 2100Q). Además, se realizó análisis en laboratorio de las concentraciones de nutrientes como: nitrógeno total (NT), nitrógeno Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal (NH_4^+) (cuantificadas por digestión con ácido sulfúrico, destilación y titulación) y fósforo total (PT) (calculado en agua por medio de ácido ascórbico), estas muestras fueron tomadas con botella tipo Kemmerer.

En el sedimento, suelo inundable y el suelo se determinó la concentración de las formas del nitrógeno (NT, NTK y NH_4^+) por digestión con ácido sulfúrico, destilación y titulación, así como el fósforo total (PT) por ignición Andersen. La concentración de carbono orgánico total (COT) se determinó por oxidación sulfocrómica. En el suelo, las concentraciones de los metales como aluminio total (AlT), calcio (Ca), hierro total (FeT), plomo total (PbT), magnesio (Mg) y manganeso total (MnT) fueron determinadas por digestión y método espectrofotométrico; el mercurio total (HgT) fue calculado por el método de extracción por microondas y cuantificación por absorción atómica de vapor

frío en un equipo Buck Scientific 410. Las muestras de sedimento y suelo inundable se tomaron con barreno a profundidad máxima de 20cm y las muestras superficiales de suelo se recogieron con una pala.

Finalmente, los porcentajes de humedad (ω), densidad (ρ), porosidad (ϕ), gravedad específica (G_s), limo (Limo), arcilla (Arcilla) y arenas finas (Arenas) fueron establecidos por método gravimétrico (Dadey *et al.* 1992). El análisis granulométrico se realizó por método hidrométrico. Estas muestras se tomaron con tubos Shelby de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura. Todas las mediciones de agua, sedimento, suelo inundable y suelo se hicieron por duplicado, pero se reportan los promedios. Las unidades de las variables se encuentran en la Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.

Análisis estadístico

El tratamiento de la información se fundamentó en el análisis descriptivo de los datos obtenidos en la ZTAT en los dos sitios y tres momentos de muestreo. Lo anterior incluyó estadísticos de tendencia central y dispersión, como valores máximos y mínimos, media aritmética, coeficiente de variación (Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4) y cajas esquemáticas (Figura 3, Figura 4 y Figura 5), con el objetivo de mostrar la distribución de cada uno de los muestreos y las zonas de la transición acuático terrestre.

Posterior al análisis descriptivo, se llevó a cabo un análisis inferencial para deter-

minar diferencias estadísticamente significativas entre sitios, subzonas de la ZTAT y muestreos por medio de la prueba no paramétrica de análisis de varianza de Kruskal-Wallis (Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4).

Adicionalmente, se realizaron pruebas de esfericidad de Bartlett y la medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO); al respecto, por Bartlett se corroboró la existencia de correlación entre las variables de objeto de estudio (valor $P < 0.05$) y por KMO se detectó que todas las variables arrojaron un valor menor a 0.5. Estos resultados sugieren que los datos no son aptos para la aplicación de un análisis factorial y en su lugar se utilizó un análisis de componentes principales ACP y, por lo tanto, no fue

necesario la eliminación de valores por comunalidad.

El análisis de componentes principales (ACP) se realizó para obtener una ordenación de las variables ambientales, el espacio y el tiempo, para ello las variables fueron estandarizadas ($(x - \text{min}) / (\text{máx.} - \text{min})$) y transformadas a su raíz cuadrada ($\sqrt{x+1}$) (Figura 6A).

Para complementar el agrupamiento espacial o temporal que generaron las variables en el ACP, se ejecutaron clúster con el método de conglomeración de Ward y métrica de distancia euclidiana cuadrada (Figura 6B y 6C). Todos los análisis estadísticos se hicieron con los promedios y se llevaron a cabo en el software R versión 4.1.3.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través de las variables *in situ* los sitios y momentos de muestreo describen la ZTAT en un humedal tropical, de columna de agua somera (no mayor a 142 cm de profundidad y en promedio 30 °C), con reducida transparencia (promedios entre 38 a 76 cm) (Figura 3A), pero baja tasa de

sólidos disueltos (entre 22 y 124 mg/L) (Figura 3D), concentraciones de oxígeno moderadas a bajas (alrededor de cuatro mg/L) (Figura 3B), pH neutro y conductancia baja (entre 50 y 121 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Figura 3C) (Tabla 1).

■ **Tabla 1.** Promedios del valor mínimo (min), máximo (máx.), media aritmética (\bar{X}) y porcentaje de coeficiente de variación (%CV) de las variables *in situ*

Sitio	ZTAT	Estadígrafo	Transparencia Secchi (cm)	Profundidad Total (cm)	OD (mg/L)	TAG (°C)	SDT (mg/L)	pH (Unidades de pH)	CE (µS/cm)	Turb (FNU)
San Francisco	AG	Min	38.0	70.0	1.6	30.2	98.3	6.8	97.6	6.7
		Max	112.5	171.0	4.5	30.9	150.3	7.0	150.3	7.0
		\bar{X}	73.2	135.3	2.8	30.6	120.2	6.9	120.1	6.8
		%CV	51.1	41.9	55.3	1.3	22.4	1.9	22.7	2.9
	SI	Min	38.3	25.0	1.3	27.4	96.3	4.5	96.6	4.0
		Max	38.3	40.0	4.3	32.0	151.3	7.0	151.4	8.1
		\bar{X}	38.3	32.5	2.7	30.4	123.8	6.3	120.7	5.6
		%CV	0.0	32.6	57.9	6.6	31.4	19.0	23.2	38.4
	SU	Min	-	-	-	18.8	-	6.8	-	-
		Max	-	-	-	31.0	-	7.0	-	-
		\bar{X}	-	-	-	26.3	-	6.9	-	-
		%CV	-	-	-	24.8	-	1.7	-	-
Paticos	AG	Min	69.0	120.0	2.7	30.0	38.0	6.0	37.7	7.2
		Max	83.0	160.0	6.2	30.6	75.3	7.1	75.4	52.3
		\bar{X}	76.0	141.7	4.2	30.3	56.7	6.7	50.4	23.2
		%CV	13.0	14.3	44.3	1.0	46.6	9.7	42.9	109.1
	SI	Min	-	35.0	1.3	27.9	3.6	5.0	32.5	6.7
		Max	-	40.0	5.7	33.3	41.0	7.0	139.8	98.8
		\bar{X}	-	37.5	3.0	30.6	22.3	6.1	71.4	38.6
		%CV	-	9.4	79.1	7.5	118.8	14.2	83.2	135.4
	SU	Min	-	-	-	31.0	-	5.0	-	-
		Max	-	-	-	37.0	-	7.0	-	-
		\bar{X}	-	-	-	34.0	-	6.0	-	-
		%CV	-	-	-	12.5	-	23.1	-	-
Prueba Kruskal - Wallis (valor P)	Sitio	0.052	0.834	0.522	0.923	0.014*	0.595	0.025*	0.025*	
	Mto	0.043*	0.004*	0.232	0.779	0.322	0.27	0.123	0.245	
Zona		0.071	1.000	0.337	0.675	0.624	0.071	0.631	0.749	

Nota. %CV resaltados y en negrita corresponden a variaciones mayores al 30%. El valor P corresponde a la prueba kruskal Wallis, valores P < 0.05 (* resaltados) indican diferencias estadísticamente significativas para la variable según el factor analizado: sitios, muestreos o zonas.

Fuente: autores.

En la Figura 3 se observa el aumento de la profundidad del SCA durante el momento de las aguas en ascenso, que coincide no solo con la época de lluvias en la región (Figura 2C), sino también con el rompimiento en la margen derecha del terraplén construido para reducir las inundaciones en La Mojana, ocurridas el 27 de agosto de 2021 (UNGRD, 2021). Este suceso se dio en el sector conocido como Cara de Gato en el municipio de San Jacinto del Cauca, situación que provocó el ingreso del exceso de agua del río Cauca hacia toda la región de La Mojana, por medio de los canales que conforman la red de este delta (Documento CONPES 4076, 2022). Por esta razón, se registraron inundaciones en Ayapel (Córdoba) y otros municipios de Colombia (UNGRD, 2021). Así como ocurrió también a mediados del año 2010 por las fuertes lluvias, asociadas al efecto de “La Niña” 2010-2011 declarada por La NOAA (Hoyos *et al.*, 2013; Rivera-Gómez *et al.*, 2019; Witkowski *et al.*, 2009); mientras que, en las aguas en descenso, aumentó la concen-

tración de los sólidos disueltos asociada a la disminución de la columna de agua, lo que generó también el incremento en la conductividad eléctrica producto de la concentración de los iones disueltos en el agua.

Con respecto a las concentraciones de nutrientes, el nitrógeno y sus formas generaron variaciones (desde valores de cinco hasta 834, 3,377 y 2,851 mg/L-kg, NH_4^+ , NTK y NT, respectivamente) (Figura 4A), estas diferencias se asociaron principalmente al contrastar los valores entre muestreos, ya que durante las aguas en ascenso se registraron las mayores concentraciones. La conexión hidrológica lateral en los ecosistemas de llanura de inundación influye en las condiciones locales de los humedales, por ejemplo, diluyendo los nutrientes y las sales disueltas o aportando sedimentos (Dube *et al.*, 2019), como ocurrió con las formas del nitrógeno (Figura 4A), la conductividad eléctrica (Figura 3C) y los sólidos disueltos totales (Figura 3D).

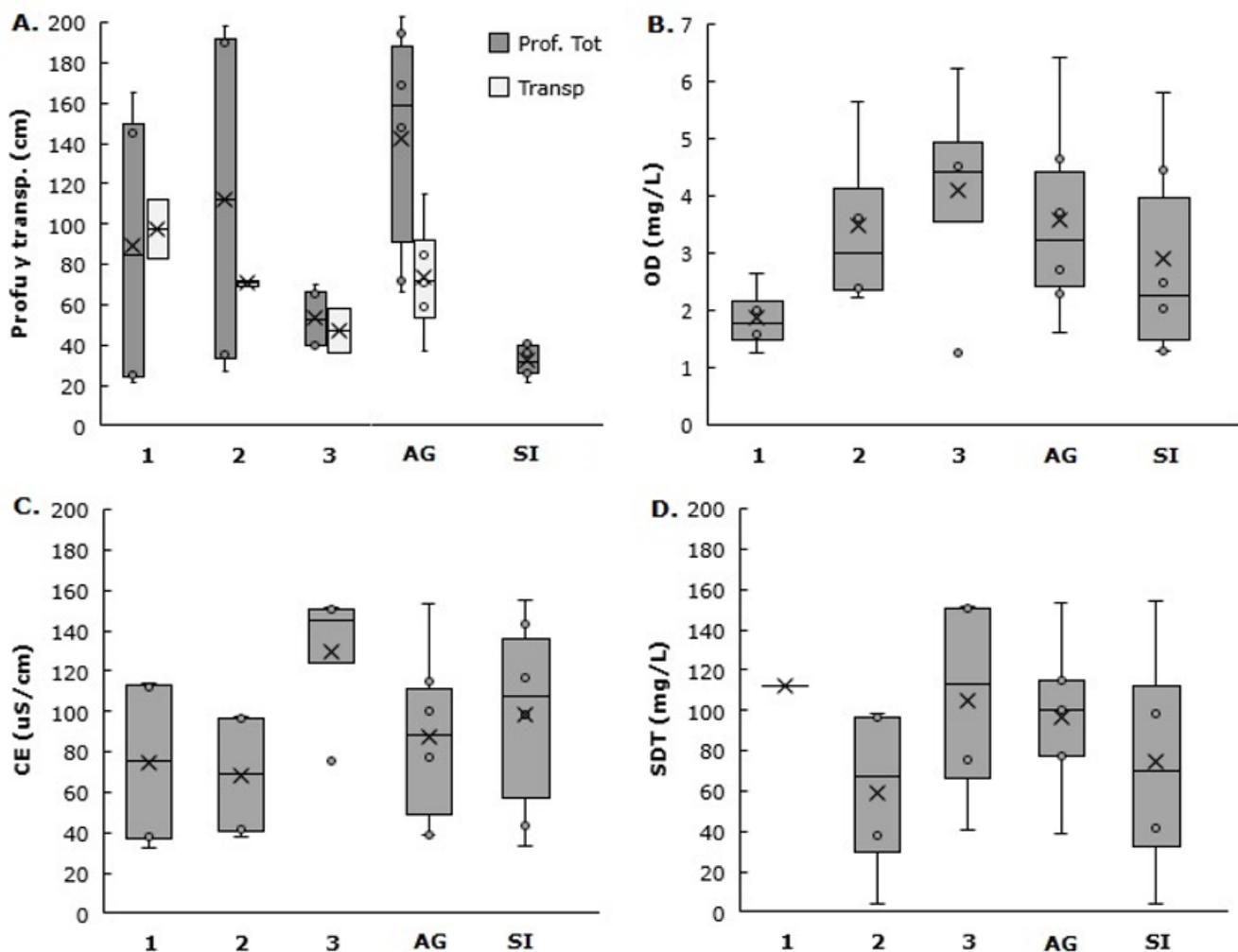


Figura 3. Distribución de las variables *in situ* considerando los momentos de muestreo y las zonas de la Transición Acuático Terrestre. **A.** Profundidad y transparencia. **B.** OD: Oxígeno disuelto. **C.** CE: Conductividad eléctrica. **Y D.** SDT: Sólidos Disueltos Totales.

Fuente: autores.

Con relación al PT se presentó una reducida variación entre el sedimento y el suelo (112 a 167 mg/kg) y concentraciones bajas en el agua (0.03 mg/L) (Tabla 2). De acuerdo con los resultados, el PT y la transparencia Secchi atribuyen al cuerpo de agua un estado mesotrófico (Cun-

ha *et al.* 2013). Tanto para las formas del nitrógeno como del fósforo, las menores concentraciones se presentaron en el agua (Figura 4A y 4B). Con respecto al COT se detectaron variaciones considerables en su concentración (9,130 a 21,023 mg/kg) (Tabla 2), las mayores concentraciones se

encontraron durante la fase de aguas en ascenso y una disminución en la etapa de aguas altas, que corresponde con lo reportado para la ciénaga por Rúa *et al.* (2013).

Además, es similar al comportamiento de la llanura de inundación “Várzea do Lago Grande de Curuai” del río Amazonas (Moreira-Turcq *et al.*, 2013).

Tabla 2. Promedios del valor mínimo (min), máximo (máx.), media aritmética (\bar{X}) y porcentaje de coeficiente de variación (%CV) del contenido de nutrientes

Sitio	Estadígrafo	NH ₄ ⁺ (mg/L (AG) mg/kg (SE, SI y SU))	NTK (mg/L)	NT (mg/L (AG) mg/kg (SE, SI y SU))	PT (mg/L (AG) mg/kg (SE, SI y SU))	COT (mg/kg)	
							ZTAT
San Francisco	AG	Min	4.0	4.0	4.0	0.0	-
		Max	4.0	5.3	5.0	0.0	-
		\bar{X}	4.0	4.6	4.5	0.0	-
		%CV	-	19.7	15.7	12.3	-
	SE	Min	361.0	2,054.3	2,547.8	112.0	13,748.5
		Max	696.3	3,326.3	2,547.8	222.4	24,053.1
		\bar{X}	528.6	2,690.3	2,547.8	167.2	18,900.8
		%CV	44.8	33.4	0	46.7	38.6
	SI	Min	361.0	1,569.3	2,440.1	112.0	6,964.6
		Max	762.0	3,453.6	2,440.1	158.2	26,037.8
		\bar{X}	561.5	2,511.4	2,440.1	135.1	16,501.2
		%CV	50.5	53.1	0.0	24.2	81.7
	SU	Min	436.9	2,288.7	2,756.0	0.0	16,892.7
		Max	602.3	2,489.3	2,756.0	282.9	25,153.3
		\bar{X}	519.6	2,389.0	2,756.0	141.4	21,023.0
		%CV	22.5	5.9	0.0	141.4	27.8

Sitio	Estadígrafo	NH ₄ ⁺ (mg/L (AG) mg/kg (SE, SI y SU))	NTK (mg/L)	NT (mg/L (AG) mg/kg (SE, SI y SU))	PT (mg/L (AG) mg/kg (SE, SI y SU))	COT (mg/kg)	
							ZTAT
Patícos	AG	Min	4.0	4.0	4.0	0.0	-
		Max	5.0	4.0	5.2	0.1	-
		X̄	4.5	4.0	4.6	0.0	-
		%CV	15.7	0.0	18.8	28.5	-
	SE	Min	370.8	1,545.2	2,851.2	112.0	10,127.7
		Max	1,297.4	5,208.2	2,851.2	112.0	23,066.0
		X̄	834.1	3,376.7	2,851.2	112.0	16,596.9
		%CV	78.6	76.7	0.0	0.0	55.1
	SI	Min	361.0	1,606.2	2,600.7	112.0	7,155.7
		Max	552.1	1,834.7	2,600.7	122.3	11,051.0
		X̄	456.6	1,720.5	2,600.7	117.2	9,103.3
		%CV	29.6	9.4	0.0	6.2	30.3
	SU	Min	361.0	1,224.0	2,653.8	142.8	7,384.0
		Max	530.2	1,774.8	2,653.8	172.5	12,963.9
		X̄	445.6	1,499.4	2,653.8	157.7	10,173.9
		%CV	26.8	26.0	0.0	13.3	38.8
Prueba Kruskal - Wallis (valor P)	Sitio	0.599	0.452	0.530	0.755	0.109	
		0.014*	0.066	0.036*	0.087		
Mto							
Zona		0.068	0.065	0.061	0.044*	0.584	

Nota. %CV resaltados y en negrita corresponden a variaciones mayores al 30%. El valor P corresponde a la prueba kruskal Wallis, valores P < 0.05 (* resaltados) indican diferencias estadísticamente significativas para la variable según el factor analizado: sitios, muestreos o zonas.

Fuente: autores.

Los cambios en el COT pueden estar asociados a un mayor proceso metabólico del sistema (Borges *et al.*, 2019), favorecido por la transición de aguas en el pulso de inundación, ya que durante aguas altas suele ser menor la concentración de COT (Figura 4C) (Ordóñez *et al.* 2014). Esto porque durante las aguas en ascenso la ve-

getación acuática presenta floraciones y fructificaciones, es decir que se encuentran en gran actividad metabólica, y cuando la columna de agua llega a su nivel máximo la cobertura de vegetación acuática disminuye, lo anterior debido a la carencia en la plasticidad morfológica de algunas especies de vegetación acuática, dificultando-

les soportar los cambios del nivel de agua (Casanova and Brock, 2000; Rodriguez and Barrera, 2006). De esta manera se ocasiona su marchitez quedando retenidas en las orillas de los cuerpos de agua, promoviendo los procesos de descomposición y disminución del COT; adicionalmente, la

descomposición de los macrófitos acuáticos es un ejemplo importante de cómo la actividad microbiana contribuye a la composición iónica (Brito *et al.*, 2014) y aumentando la CE, como ocurrió en marzo de 2022 (Figura 3C).

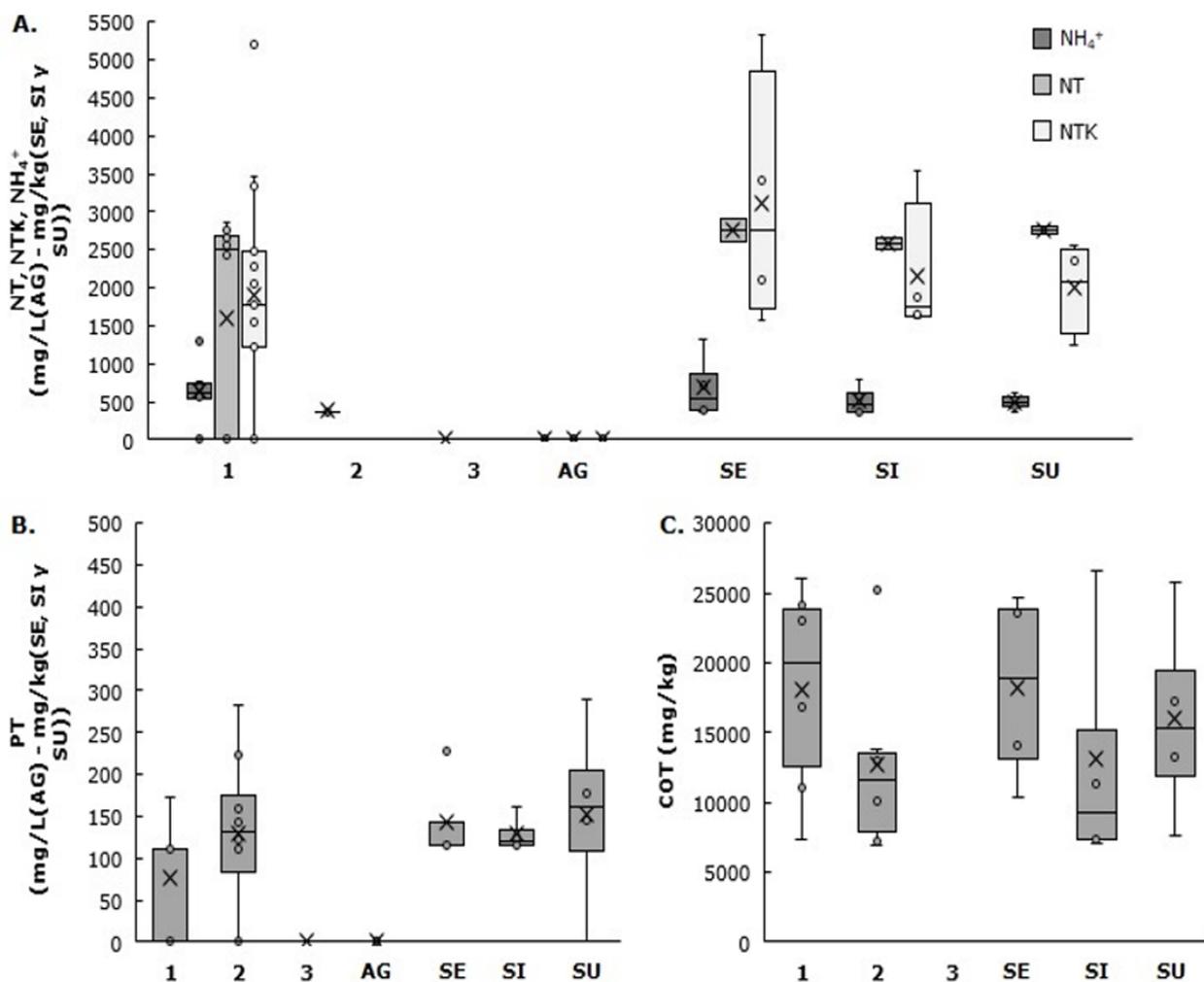


Figura 4. Distribución del contenido de nutrientes considerando los momentos de muestreo y las zonas de la Transición Acuático Terrestre. **A.** NT: Nitrógeno total, NTK: Nitrógeno total Kjeldahl, NH_4^+ : Nitrógeno amoniacal. **B.** PT: Fósforo Total. Y **C.** COT: Carbono Orgánico Total.

Fuente: autores.

En cuanto a la concentración de los metales analizados, se registraron tendencias similares en el espacio y el tiempo; el aluminio total osciló entre 5,425 y 10,142 mg/kg; el calcio entre 13 y 66 mg/kg; el hierro total entre 22,087 y 39,062 mg/kg; el magnesio y manganeso total entre

47 y 171 mg/kg y entre 33 y 191 mg/kg respectivamente. Las concentraciones de mercurio y plomo totales fueron bajas y sin variación en los ambientes y zonas de estudio para el caso 140 y 10 mg/kg, respectivamente (Tabla 3).

Tabla 3. Promedios del valor mínimo (min), máximo (máx.), media aritmética (\bar{X}) y porcentaje de coeficiente de variación (%CV) de la concentración de metales en el sedimento y suelo inundable

Sitio	ZTAT	Estadígrafo	AIT (mg/kg)	Ca (mg/kg)	FeT (mg/kg)	Mg (mg/kg)	MnT (mg/kg)	HgT (mg/kg)	PbT (mg/kg)
San Francisco	SE	Min	3,436.5	29.1	18,669.7	73.4	79.5	140.0	10.0
		Max	8,253.9	44.5	29,463.1	117.7	116	140.0	10.0
		\bar{X}	5,845.2	36.8	24,066.4	95.6	97.7	140.0	10.0
		%CV	58.3	29.6	31.7	32.8	26.4	0.0	0.0
	SI	Min	4,282.7	56.5	31,296.0	36.1	146.3	140.0	10.0
		Max	10,274.3	74.9	46,827.6	306.4	235.1	140.0	10.0
		\bar{X}	7,278.5	65.7	39,061.8	171.2	190.7	140.0	10.0
		%CV	58.2	19.8	28.1	111.6	32.9	0.0	0.0
Paticos	SE	Min	3,066.1	10.4	15,682.2	31.3	31.5	140.0	10.0
		Max	17,217.4	37.2	28,491.3	146.8	74.0	140.0	10.0
		\bar{X}	10,141.8	23.8	22,086.7	89.0	52.7	140.0	10.0
		%CV	98.7	79.8	41.0	91.8	57.1	0.0	0.0
	SI	Min	3,559.8	10.0	21,763.7	29.9	29.9	140.0	10.0
		Max	7,290.0	16.5	24,716.1	64.9	36.8	140.0	10.0
		\bar{X}	5,424.9	13.2	23,239.9	47.4	33.3	140.0	10.0
		%CV	48.6	34.5	9.0	52.2	14.6	0.0	0.0
Prueba Kruskal - Wallis (valor P)	Sitio	0.773	0.043*	0.149	0.248	0.021*	-	-	
	Mto	0.021*	0.564	0.386	0.043*	1.000	-	-	
	Zona	0.773	0.773	0.248	0.564	0.773	-	-	

Nota. %CV resaltados y en negrita corresponden a variaciones mayores al 30%. El valor P corresponde a la prueba kruskal Wallis, valores P < 0.05 (* resaltados) indican diferencias estadísticamente significativas para la variable según el factor analizado: sitios, muestreos o zonas.

Fuente: autores.

El grupo de variables asociadas a los sedimentos y el suelo no reflejaron diferencias en las tendencias espaciales y temporales, su patrón representa unos ambientes de baja gravedad y densidad (promedios de 2%), humedades y porosi-

dades moderadas a altas (62-91 % y 47-68 %, respectivamente), con mayor porcentaje de arenas finas (45-59 %) con respecto a las proporciones de limos y arcillas (13 - 36 %) (Tabla 4 y Figura 5).

Tabla 4. Promedios del valor mínimo (min), máximo (máx.), media aritmética (\bar{X}) y porcentaje de coeficiente de variación (%CV) de las características físicas del sedimento, suelo inundable y suelo

Sitio	ZTAT	Estadígrafo	w (%)	p (%)	q (%)	G_s (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Arenas Finas (%)
San Francisco	SE	Min	62.7	0.9	44.3	2.3	9.1	20.0	41.6
		Max	90.6	1.6	75.0	2.4	38.5	27.4	63.5
		\bar{X}	81.0	1.3	58.9	2.4	21.3	24.1	54.6
		%CV	19.5	28.7	26.2	0.7	71.7	15.8	21.1
	SI	Min	43.8	0.9	34.5	2.2	13.2	11.3	30.5
		Max	98.7	2.0	70.3	2.5	58.2	27.0	59.8
		\bar{X}	69.3	1.6	50.2	2.4	35.7	19.0	45.3
		%CV	39.9	37.8	36.4	6.1	63.0	41.2	32.3
	SU	Min	36.8	0.8	62.2	2.2	19.5	13.2	38.5
		Max	87.1	1.3	74.9	2.3	48.2	24.2	59.1
		\bar{X}	65.2	1.1	67.9	2.3	29.5	19.1	51.3
		%CV	39.5	25.9	9.5	1.3	54.9	28.9	21.8
Patiscos	SE	Min	87.7	1.6	39.2	2.1	4.2	25.4	48.4
		Max	96.0	1.9	53.8	2.5	26.2	30.4	65.4
		\bar{X}	91.4	1.7	46.9	2.3	13.1	28.0	58.9
		%CV	4.6	10.6	15.6	7.3	88.8	8.9	15.6
	SI	Min	75.0	1.4	39.6	2.3	18.0	16.5	44.7
		Max	88.5	1.8	53.5	2.5	33.0	26.0	56.0
		\bar{X}	82.1	1.6	48.6	2.4	26.3	21.6	52.1
		%CV	8.2	12.8	16.2	5.2	29.0	22.3	12.3
	SU	Min	47.8	1.0	63.4	2.0	17.9	16.7	37.6
		Max	74.1	1.2	63.4	2.5	45.7	18.9	63.6
		\bar{X}	62.4	1.1	63.4	2.3	32.7	18.0	49.3
		%CV	21.4	12.4	0.1	10.0	42.7	6.4	26.8

Sitio	ZTAT	Estadígrafo	ω (%)	P (%)	ϕ (%)	Gs (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Arenas Finas (%)
Prueba Kruskal - Wallis (valor P)	Sitio		0.566	0.354	0.310	0.930	0.508	0.627	0.627
			0.203	0.229	0.203	0.475	0.927	0.296	0.960
Mto									
Zona			0.067	0.049*	0.057	0.420	0.143	0.034*	0.296

Nota. %CV resaltados y en negrita corresponden a variaciones mayores al 30%. El valor P corresponde a la prueba kruskal Wallis, valores P < 0.05 (* resaltados) indican diferencias estadísticamente significativas para la variable según el factor analizado: sitios, muestreos o zonas.

Fuente: autores.

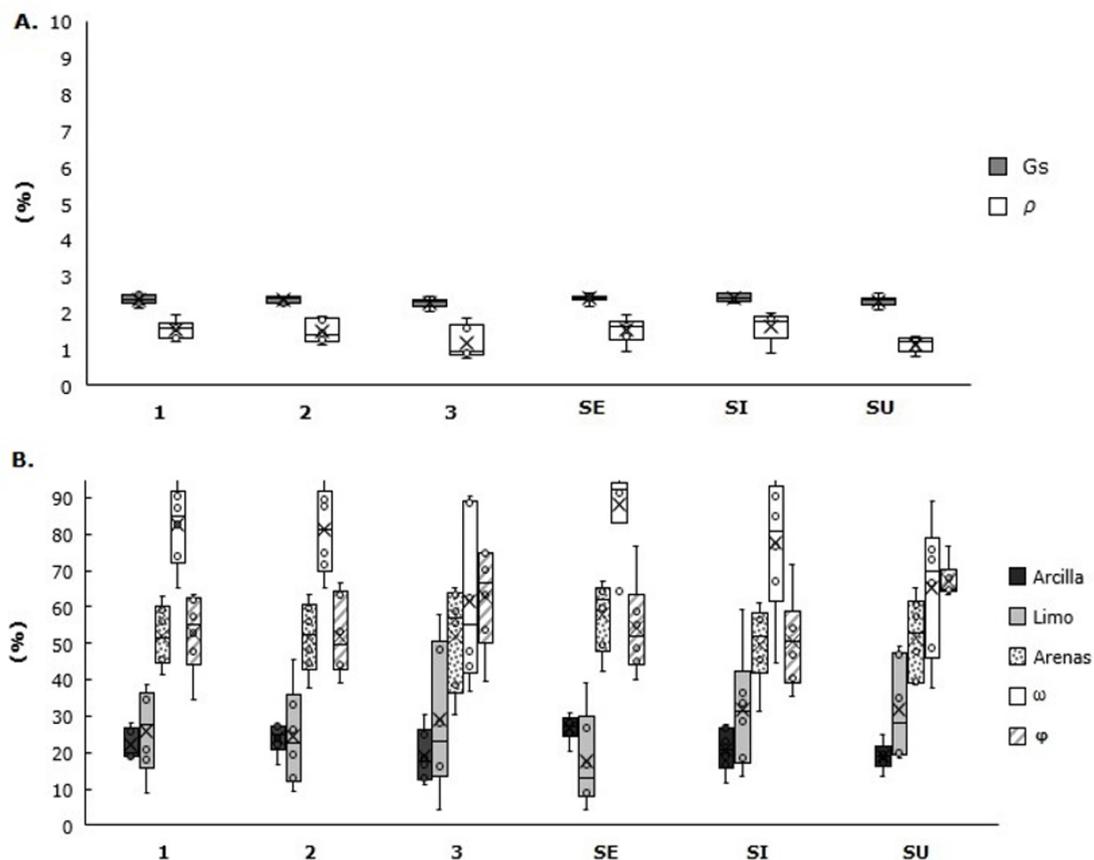


Figura 5. Distribución de las características físicas del sedimento, suelo inundable y suelo, considerando los momentos de muestreo y las zonas de la Transición Acuático Terrestre. **A.** Gs: gravedad específica y ρ : densidad. **B.** ω : humedad, ϕ : porosidad, **Arcilla:** porcentaje de arcillas, **Limo:** porcentaje de limos y **Arenas:** porcentaje arenas finas.

Fuente: autores.

Al considerar el análisis de medianas Kruskal-Wallis por cada factor (sitio, muestreo y zona de transición acuático terrestre), se detectaron diferencias significativas (valores $P < 0.05$) del calcio entre ciénagas, aunque el rango de esta variable no implica realmente diferencias ecológicas importantes. Además de diferencias en los sólidos disueltos totales ($P=0.014$), la conductividad eléctrica ($P=0.025$) y la turbiedad ($P=0.025$), probablemente asociadas a que la ciénaga Paticos, se caracteriza por tener descargas de aguas residuales domésticas provenientes del casco urbano (Chalarca *et al.*, 2007). Los resultados difieren de lo reportado por Borges *et al.* (2013), que encontraron en la cuenca del río Solimões, en la Amazonía Brasileña, como principal factor diferenciador el pH en lo que se refiere a la influencia de las aguas residuales; mientras la conductividad eléctrica y la transparencia del agua están determinadas por los diferentes momentos del ciclo hidrológico, siendo esta última también estadísticamente significativa para el sistema cenagoso de Ayapel (SCA) ($P=0.043$) (Tabla 1).

Con respecto a los tres muestreos se registraron diferencias en las concentraciones de nitrógeno amoniacal, el nitrógeno total Kjeldahl y el nitrógeno total, debido al registro de mayores concentraciones durante el primer muestreo correspondiente a aguas en ascenso (julio de 2021).

Adicionalmente, las concentraciones de aluminio total y magnesio también registraron diferencias temporales, pero los rangos de estas variaciones no implican

diferencias ambientales relevantes (5,425-10,142 mg/kg y 47-171 mg/kg) debido a que constituye el 8.1 % de la corteza terrestre, lo cual lo convierte en el segundo metal más abundante, proviniendo principalmente de fuentes naturales, al ser uno de los principales constituyentes de los silicatos que componen las arcillas minerales (Pérez *et al.*, 2015).

En cuanto al Mg, el 70 % de este metal alcalino está asociado a la fracción fina, lo que sugiere una constitución de minerales arcillosos que contienen Na y Mg en su estructura octaédrica y, en consecuencia, principalmente natural (Vital and Stattegger, 2000). Finalmente, entre las zonas de análisis de la transición acuático terrestre el porcentaje de la densidad y las arcillas registró una proporción relativamente mayor en la zona de los sedimentos y suelo inundable; sin embargo, estas diferencias significativas no están asociadas a una real diferenciación ambiental entre los compartimentos.

El análisis de componentes principales realizado con las variables físicas y químicas, en función de las ZTAT en cada sitio y muestreos (Figura 6A), indicó la selección de aquellos componentes que presentaran valores propios mayores a 1. Según el criterio de la raíz latente, la explicación de la varianza total de los dos primeros componentes correspondió al 71.1% (CP1=59.6% y CP2=11.5%). Cada componente estuvo representado en la Ecuación 1 y la Ecuación 2, por el conjunto de variables con criterio mayor a 0.4.

$$PC1 = 0.7583OD - 0.6779T_{AG} - 0.7147SDT - 0.7765pH - 0.7976CE - 0.5888Turb + 0.8118NH_4^+ + 0.6316FeT + 0.8225NTK + 0.7679PT + 0.6952COT + 0.4846NT + 0.700\omega + 0.9411\varrho + 0.6834\varphi + 0.8958Gravas + 0.7091Limos + 0.9302Arcillas + 0.8866Arenas$$

(Ecuación 1)

$$PC2 = 0.5995AIT + 0.6468Ca + 0.6258Mg + 0.6032MnT$$

(Ecuación 2)

Al observar la ordenación de la Figura 6A, fue notable que el grupo de variables compuesto por los SDT, la CE, el OD, la turbidez, la T_{AG} y el pH se asocia con las zonas de transición del agua y el suelo inundable de ambos sitios (San Francisco y Paticos); a su vez, este grupo se ubica en forma contraria a la representación de los vectores de los metales, los nutrientes y las variables asociadas a las características del suelo, asociados con las zonas de transición del sedimento y el suelo en ambas estaciones. Esto significa que la ZTAT responde a bajas concentraciones de metales y nutrientes, por lo que es de esperar que el suelo y los sedimentos actúan como reservorio de estas sustancias, que eventualmente estarán disponibles en el agua si las condiciones como pH y oxígeno cambian en el sistema.

Aunque en el análisis de componentes principales los sitios (Paticos y San Fran-

cisco) no tienen una tendencia o clara separación con respecto a las variables analizadas, sí se puede visualizar una diferenciación en las subzonas de la ZTAT durante el tercer muestreo (aguas en descenso); particularmente, su ubicación en el espacio bidimensional correspondió a los valores medios de los vectores que representan las variables (Figura 6A). Con base en la información anterior, se llevó a cabo un análisis de clasificación tipo clúster, teniendo en consideración las variables *in situ* como el pH, la temperatura, la turbidez, el oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales (Figura 6B). La clasificación demostró una separación clara de las estaciones San Francisco y Paticos, generando una relativa segregación de las zonas de sedimento, suelo inundable y suelo (Figura 6C). Los agrupamientos no evidenciaron separaciones asociadas a los muestreos (Figura 6B y 6C).

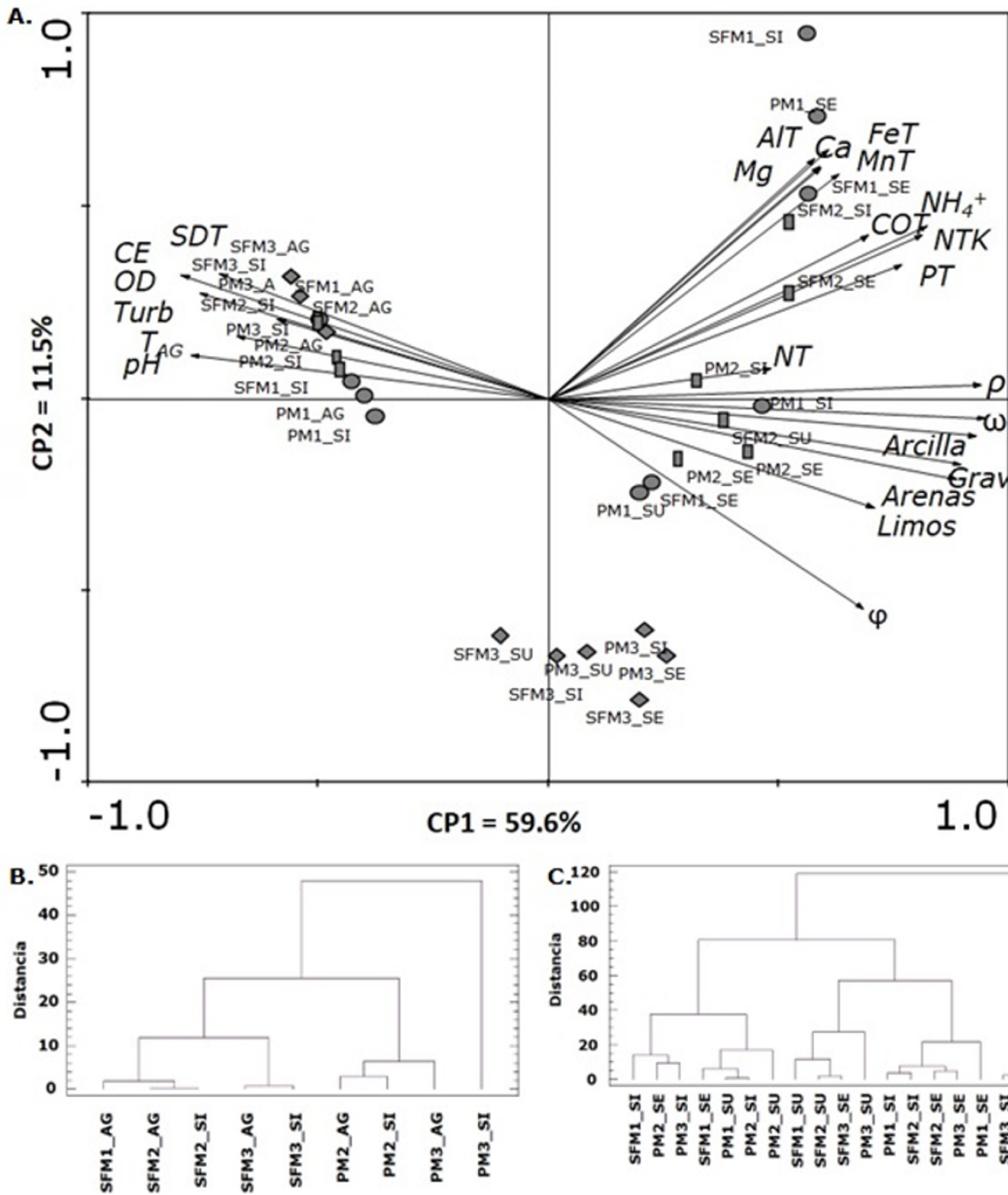


Figura. 6. A. Análisis de componentes principales de las variables ambientales, estaciones, muestreos y zonas de transición acuático terrestre. B. Análisis de agrupamiento usando variables in situ y C. características del suelo. Donde: Sitios (SF: San Francisco, P: Paticos), muestreos (1: julio/2021, 2: septiembre/2022, 3: marzo/2022), Zona en la transición acuático terrestre (AG: Agua, SE: sedimento, SI: Suelo inundable y SU: Suelo).

Fuente: autores.

Las propiedades fisicoquímicas que caracterizan las planicies de inundación impulsan adaptaciones a nivel funcional y comprenden un monitoreo complejo poco abordado en sistemas tropicales, siendo la Amazonía brasilera un sistema de referencia del estudio de este ecotono (Junk *et al.*, 2013, 2020; Kayler *et al.*, 2019). El abordaje de la ZTAT en este trabajo se realizó en dos estaciones y tres momentos de muestreo a través del análisis en la columna del agua, el sedimento, el suelo inundable y el suelo; compartimentos influenciados por la magnitud, frecuencia y duración de la inundación. Gracias a este diseño y a las variables ambientales fue posible detectar particularidades de este complejo ecotono.

La evaluación espacial y temporal representó variaciones por medio de diferentes grupos de parámetros, en primer lugar, la mayor diferencia temporal estuvo principalmente generada por la profundidad y la transparencia, además de una mayor concentración de formas de nitrógeno y algunos iones como aluminio y magnesio, durante el muestreo de aguas en ascenso (julio de 2021). También, el ordenamiento reveló que el muestreo en aguas en descenso (marzo de 2022) se separó en una posición intermedia entre los valores extremos de variables *in situ*, concentración de nutrientes y porcentajes de material en el suelo, lo que demuestra que la desviación estándar entre los datos se movilizó entre los muestreos de transición o ascenso a aguas altas y aguas altas.

Al respecto, un ciclo del pulso de inundación temporal envuelve procesos de secado, humedecimiento e inundación, expansión, homogenización e incremento de la conectividad espacial, lo que activa un conjunto de procesos en el ecosistema como cambios térmicos e hidrodinámicos, entrada de sustancias transportadas por el flujo (disueltas o suspendidas, orgánicas e inorgánicas) e inundación de hábitats terrestres en la franja periférica, movilizándose materiales orgánicos e inorgánicos depositados durante la fase terrestre por el agua sobrenadante (Junk and Wantzen, 2004), lineamientos que concuerdan con la identificación de señales temporales registradas por medio de este estudio.

Al analizar la condición espacial, la conductividad eléctrica y la concentración del calcio, se registraron diferencias leves, pero un análisis de agrupamiento usando las variables *in situ* separó las estaciones Paticos y San Francisco por medio de las cuantificaciones en columna de agua y suelo inundable. Las variables asociadas a las características del suelo también segregaron parcialmente las dos estaciones, tendiendo además a separar al interior de ellas las zonas ubicadas en el sedimento y suelo inundable con respecto a las ubicadas en el suelo. Este resultado demuestra que la ZTAT revela aspectos potencialmente diferenciables entre diferentes sitios o regiones del humedal y su aptitud ecológica, pero se concluye que únicamente era posible detectarlo gracias al contraste espacial, incluyendo no sólo diferentes estaciones de muestreo, sino

también el análisis de la ZTAT a través de variables ambientales.

Es importante mencionar que ambas estaciones de muestreo presentan la incidencia de un relativo aislamiento, lo cual ha significado una menor exposición de estos cuerpos de agua a las descargas asociadas a actividad minera reportadas en la zona (Zabala *et al.*, 2019), asunto corroborado en este estudio por concentraciones de mercurio o plomo que no se asocian a valores de riesgo (Junk *et al.*, 2020). Lo anterior, probablemente generó un grado de similitud expuesto por las variables *in situ*, las concentraciones de nutrientes, metales y los porcentajes de la estructura del suelo; probablemente acorde al uso del suelo influyente, existieron diferencias en el nitrógeno, el fósforo, el carbono orgánico total y el porcentaje de arcillas, visualizadas gracias al contraste adicional entre los momentos de inundación y/o las zonas de transición analizadas. Dichos resultados evidencian y corroboran que estas variables podrían ser consideradas indicadores del uso del suelo en la gestión de los humedales tropicales, ya que reflejan procesos que combinan la deposición y el lavado de materiales, escenarios que requieren diseño de adaptaciones ante un uso del suelo expansivo.

Adicionalmente, se considera que una longitud limitada del *fetch* efectivo y en

consecuencia, un menor trabajo mecánico de resuspensión por acción del viento y el oleaje (Montoya y Aguirre, 2013), permite asumir que ambos sitios se encuentran aislados y sus ZTAT representan su identidad local, aspecto relevante en el diseño del estudio de un humedal a través de su ZTAT para establecer si los sitios son en realidad contrastantes, tal como se verificó para la selección de los sitios de muestreo de este trabajo (Paticos y San Francisco).

La transición de fase terrestre a fase acuática representa un conjunto de válvulas de alternancia entre entradas y salidas de energía, nutrientes y materiales, representando un eje ecológico que depende de la variabilidad natural hidrológica, por lo que los humedales son funcionalmente ecosistemas indicadores y altamente vulnerables (Xiang *et al.*, 2016). Por esta razón, abordar el análisis de los procesos que vinculan los sistemas terrestres y acuáticos es crucial para el diseño y establecimiento de lineamientos para la gestión de los humedales (Dgebuadze and Gladyshev, 2016; Junk *et al.*, 2020; Ricourte *et al.*, 2017). De esta manera, el presente trabajo expuso particularidades ambientales detectadas a través del diseño espacial y temporal, aspectos relevantes en la condición local o identidad de cada humedal.

CONCLUSIONES **4**

En síntesis, evaluar la ZTAT a través del factor temporal expuso cambios a través del nivel del agua, la transparencia Secchi y concentraciones de nitrógeno, mientras el espacio asistido por el contraste de la ZTAT en los dos sitios reflejó diferenciaciones a través de las variables *in situ* sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y turbiedad. Al respecto, es claro que la principal fuerza que controla la dinámica y los procesos en la ZTAT es el pulso de inundación, períodos de anegamiento, sedimentación, ancho de la ZTAT y el tiempo de sequía o fase terrestre (Junk *et al.*, 2012); teniendo influencia sobre la productividad primaria, la germinación o marchitez de la vegetación acuática (Casanova and Brock, 2000; Rodríguez y Barrera, 2006), las entradas

o salidas de materia orgánica, iones, nutrientes (Dube *et al.*, 2019; Moreira-Turcq *et al.*, 2013), metales pesados (Rúa *et al.*, 2013). pero el predominio de los aportes alóctonos en humedales provenientes de la época de lluvias. En contraste, la intensificación de procesos de colmatación y dinámica endógenos en la época de sequía sólo pueden ser visualizados a través del estudio de diferentes compartimentos de la ZTAT (Earl *et al.*, 2014; Neiff, 2001). Es así como las variables mencionadas podrían ser consideradas en el análisis de una ZTAT, pero es necesario que el diseño incluya puntos contrastantes y diferentes momentos hidrológicos, lo que potenciará el diseño y la detección fisicoquímica asociada a la compleja escala de los procesos en los humedales.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Maria Díaz-Mesa: conceptualización, metodología, análisis de datos, investigación, escritura, borrador original, administradora del proyecto. **Esnedy Hernández:** conceptualización, metodología, análisis de datos, investigación, logística, escritura, borrador original, supervisión, adquisición de recursos. **Diana M. Agudelo:** conceptualización, meto-

dología, análisis de datos, investigación, escritura, borrador original, supervisión. **Nora E. Villegas:** conceptualización, revisión y edición. **Gabriel A. Agudelo:** investigación, escritura, borrador original. **Sergio E. Herazo:** investigación, escritura, borrador original. **Lina Berrouet:** conceptualización, revisión y edición. **Laura M. Lozano:** investigación, revisión y edición.

Natalia Espinosa: investigación, revisión y edición. **Yarin T. Puerta:** investigación, revisión y edición. **Fabio D.J. Vélez:** conceptualización, logística, revisión y edición. **Néstor J. Aguirre:** conceptualización, logística, revisión y edición. **Mario A. Quijano-Abril:** revisión y edición. **José**

M. Rojas-Villa: investigación, revisión y edición. **Daniela Cardona:** investigación, revisión y edición. **Daniela Salazar:** investigación, revisión y edición. **Álvaro Wills:** conceptualización, investigación, escritura, borrador original, supervisión.

■ AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevó a cabo gracias a la financiación del fondo CODI, Universidad de Antioquia, bajo el Fondo de Apoyo al Primer Proyecto de Profesores.

Adicionalmente, los autores agradecen el apoyo de las actividades en campo a Libia Oviedo y Wilson Pérez, pobladores de la zona de muestreo.

■ LITERATURA CITADA

Borges, J., Rosinski, M, de Jesús, M., Pedrociane, D; Alves, J., Pucci, A., Zucchi, N. Barbosa, C., Aquino, S. and Lima, H. (2013). Influence of the hydrological cycle on physical and chemical variables of water bodies in the várzea areas of the middle solimoes river region (Amazonas, Brazil). *UAKARI*, 9(2), 75–90. <https://doi.org/10.31420/uakari.v9i2.149>

Borges, A. V., Darchambeau, F., Lambert, T., Morana, C., Allen, G. H., Tambwe, E., Toengaho Sembaito, A., Mambo, T., Wabakhangazi, J. N., Descy, J. P., Teodoru, C. R., and Bouillon, S. (2019). Variations in

dissolved greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) in the Congo River network overwhelmingly driven by fluvial-wetland connectivity. *Biogeosciences*, 16(19), 3801–3834. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3801-2019>

Brito, J. G. de, Alves, L. F., and Espirito Santo, H. M. V. (2014). Seasonal and spatial variations in limnological conditions of a floodplain lake (lake Catalão) connected to both the Solimões and Negro Rivers, Central Amazonia. *Acta Amazonica*, 44(1), 121–133. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672014000100012>

- Casanova, M. T., and Brock, M. A. (2000). How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? *Plant Ecology*, 147(2), 237–250. <https://doi.org/10.1023/A:1009875226637>
- Chalarca, D., Mejía, R. y Aguirre, N. (2007). Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 40, 41–58.
- Cunha, D. G. F., Calijuri, M. do C., and Lamparelli, M. C. (2013). A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr). *Ecological Engineering*, 60, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>
- Dadey, K. A., Janecek, T., and Klaus, A. (1992). Dry-bulk density: its use and determination. *Proc., Scientific Results, ODP, Leg 126, Bonin Arc/Trench System*, 126, 551–554. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.126.157.1992>
- Darrah, S. E., Shennan-Farpón, Y., Loh, J., Davidson, N. C., Finlayson, C. M., Gardner, R. C., and Walpole, M. J. (2019). Improvements to the Wetland Extent Trends (WET) index as a tool for monitoring natural and human-made wetlands. *Ecological Indicators*, 99(December 2018), 294–298. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.032>
- Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Documento CONPES 4076. DNP. [https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Conpes/CONPES 4076 DE 2022.pdf](https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Conpes/CONPES%204076%20DE%202022.pdf)
- Dgebuadze, Y. Y., and Gladyshev, M. I. (2016). Biotic fluxes of matter and energy between aquatic and terrestrial ecosystems. *Contemporary Problems of Ecology*, 9(4), 391–395. <https://doi.org/10.1134/S1995425516040041>
- Dube, T., Pinceel, T., De Necker, L., Wepener, V., Lemmens, P., and Brendonck, L. (2019). Lateral hydrological connectivity differentially affects the community characteristics of multiple groups of aquatic invertebrates in tropical wetland pans in South Africa. *Freshwater Biology*, 64(12), 2189–2203. <https://doi.org/10.1111/fwb.13406>
- Earl, J. E., Castello, P. O., Cohagen, K. E., and Semlitsch, R. D. (2014). Effects of subsidy quality on reciprocal subsidies: How leaf litter species changes frog biomass export. *Oecologia*, 175(1), 209–218. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2870-x>
- Gardner, R. C., and Finlayson, M. (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales. *Convección de Ramsar Sobre los Humedales*, 88. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/gwo_s.pdf
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M., and Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Ap-*

- plied Geography, 39(September 2011), 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.018>
- Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Lourival, R., Wittmann, F., Kandus, P., Lacerda, L. D., Bozelli, R. L., Esteves, F. A., Nunes da Cunha, C., Maltchik, L., Schöngart, J., Schaeffer-Novelli, Y., and Agostinho, A. A. (2013). Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 24(1), 5–22. <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>
- Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Schöngart, J., and Wittmann, F. (2012). A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas). *Wetlands Ecology and Management*, 20(6), 461–475. <https://doi.org/10.1007/s11273-012-9268-0>
- Junk, W. J., and Wantzen, K. M. (2004). The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications - an update. *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries*, May, 117–149.
- Junk, W. J., Wittmann, F., Schöngart, J., Piedade, M. T. F., and Cunha, C. N. (2020). Large Rivers and their Floodplains. In *Introducing Large Rivers* (pp. 55–101). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118451410.ch5>
- Kayler, Z. E., Premke, K., Gessler, A., Gessner, M. O., Griebler, C., Hilt, S., Klemmedtsson, L., Kuzyakov, Y., Reichstein, M., Siemens, J., Totsche, K. U., Tranvik, L., Wagner, A., Weitere, M., and Grossart, H. P. (2019). Integrating aquatic and terrestrial perspectives to improve insights into organic matter cycling at the landscape scale. *Frontiers in Earth Science*, 7(June), 1–14. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00127>
- Let, M., and Pal, S. (2023). Socio-ecological well-being perspectives of wetland loss scenario: A review. *Journal of Environmental Management*, 326(PB), 116692. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116692>
- Mitsch, W. J., Bernal, B., and Hernandez, M. E. (2015). Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 11(1), 1–4. <https://doi.org/10.1080/21513732.2015.1006250>
- Montoya, y Aguirre. (2013). Dinámica físico-química de las aguas de un sistema de planicies inundables tropicales. *Revista Facultad de Ingeniería*, 69, 256–273. <https://doi.org/10.17533/udea.re-din.18154>
- Moreira-Turcq, P., Bonnet, M. P., Amorim, M., Bernardes, M., Lagane, C., Maurice, L., Perez, M., and Seyler, P. (2013). Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(1), 119–130. <https://doi.org/10.1002/gbc.20022>
- Mori, G. B., Schiatti, J., Poorter, L., and Piedade, M. T. F. (2019). Trait divergence and habitat specialization in trop-

- ical floodplain forests trees. *PLoS ONE*, 14(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212232>
- Neiff, J. J. (2001). Diversity in some tropical wetland systems of South America. In B. Gopal, W. J. Junk, and J. Davies (Eds.), *Biodiversity in wetlands: assesment, function and conservation* (Vol. 2. 157-186).
- Ordóñez, M. C., Bravo, I., y Figueroa, A. (2014). Flujo de Carbono Orgánico Total (COT) en una cuenca andina: caso sub-cuenca Río Las Piedras. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 29-42. <https://doi.org/10.22395/rium.v13n24a2>
- Pérez, C., Maurice, L., Ochoa-Herrera, V., López, F., Egas, D., Lagane, C., and Beson, P. (2015). Analisis of major cations in bottom sediments from oil impacted Rivers , in the Ecuadorian Amazon. *Avances*, 7(December), C 95-C 115.
- Puerta, T. Y., Aguirre, N. J. y Vélez, F. de J. (2016). Sistema cenagoso de Ayapel como posible sitio Ramsar en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 19(1), 110-122.
- Reid, W. V. (2005). Ecosystems and human well-being: a report on the conceptual framework working group of the Millennium Ecosystem Assessment. In *Ecosystems*, 5(81).
- Ricaurte, L. F., Olaya-Rodríguez, M. H., Cepeda-Valencia, J., Lara, D., Arroyave-Suárez, J., Max Finlayson, C., and Palomo, I. (2017). Future impacts of drivers of change on wetland ecosystem services in Colombia. *Global Environmental Change*, 44, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.001>
- Ricaurte, L. F., Patiño, J. E., Zambrano, D. F. R., Arias-G, J. C., Acevedo, O., Apon-te, C., Medina, R., González, M., Rojas, S., Flórez, C., Estupinan-Suarez, L. M., Jaramillo, Ú., Santos, A. C., Lasso, C. A., Nivia, A. A. D., Calle, S. R., Vélez, J. I., Acosta, J. H. C., Duque, S. R., ... Junk, W. J. (2019). A Classification System for Colombian Wetlands: an Essential Step Forward in Open Environmental Policy-Making. *Wetlands*, 39(5), 971-990. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01149-8>
- Rivera-Gómez, M., Giraldo, A., and Lavaniegos, B. E. (2019). Structure of euphausiid assemblages in the Eastern Tropical Pacific off Colombia during El Niño, La Niña and Neutral conditions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 516(April), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2019.04.002>
- Rodríguez, W. y Barrera, J. A. (2006). Lineamientos generales de manejo y conservación del complejo de humedales de Ayapel, Departamento de Córdoba, Colombia. Universidad de Antioquia.
- Rúa, A. F., Flórez, M. T. y Palacio, J. (2013). Variación espacial y temporal en los contenidos de mercurio, plomo, cromo y materia orgánica en sedimento del complejo de humedales de Ayapel, Córdoba, noroccidente colombiano. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 69, 244-255.

- Shafi, A., Chen, S., Waleed, M., and Sajjad, M. (2023). Leveraging machine learning and remote sensing to monitor long-term spatial-temporal wetland changes: Towards a national RAMSAR inventory in Pakistan. *Applied Geography*, 151(December 2022), 102868. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102868>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (UNGRD). (2021). Boletín Informativo No. 120 Gobierno nacional responde de manera inmediata y articulada ante emergencia en “Cara de Gato”. UNGRD.
- Vital, H., and Stattegger, K. (2000). Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon River. *Chemical Geology*, 168(1–2), 151–168. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00191-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00191-1)
- Witkowski, A., Cedro, B., Kierzek, A., and Baranowski, D. (2009). Diatoms as a proxy in reconstructing the Holocene environmental changes in the south-western Baltic Sea: The lower Rega River Valley sedimentary record. *Hydrobiologia*, 631(1), 155–172. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9808-7>
- Xiang, H., Zhang, Y., and Richardson, J. S. (2016). Importance of Riparian Zone: Effects of Resource Availability at Land-water Interface. *Riparian Ecology and Conservation*, 3(1), 1–17. <https://doi.org/10.1515/remc-2016-0001>
- Zabala, A. M., Hernández, E., Agudelo, D. M., Aguirre, N. J. y Vélez, F. D. J. (2019). Variación temporal de la morfología funcional del fitoplancton en una planicie inundable del Caribe Colombiano. *Biota Colombiana*, 20(2). <https://doi.org/10.21068/c2019.v20n02a01>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

**Licencia de Creative Commons**

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.