

Relación del pulso hidrológico con la estratigrafía del sedimento del complejo de humedales de Ayapel, Colombia

Relation of hydrological pulse to sediment stratigraphy in the Ayapel Flood Plain Lake, Colombia

Alex Rúa*, Jaime Palacio Baena, María Teresa Flórez Molina

Grupo de investigación en gestión y modelación ambiental [GAIA]
Universidad de Antioquia. Apartado 1226. Medellín, Colombia.

(Recibido el 12 de enero de 2013. Aceptado el 11 de octubre de 2013)

Resumen

El pulso hidrológico y la transferencia de masa entre los tributarios y humedales conectan los ambientes terrestres con los reotróficos. La interacción agua-sedimento en humedales de la sabana atlántica colombiana es prácticamente desconocida a escala multidecadal. Por esta razón, se realizaron tres correlaciones estratigráficas entre nueve perfiles de sedimento (13-30 cm) del complejo de humedales de Ayapel (CHA) que abarcaron *ca.* 110-600 a BP. Las correlaciones enmarcaron (i) zonas de alta presión antrópica, (ii) hidrodinámica principal y (iii) aportes de materia orgánica (MO). El CHA se extiende 150 km² de los cuales >84 % comprendió sedimento mineral óxido susceptible de diagénesis temprana. En contraste, el sedimento reducido en estratos anaerobios de algunos humedales menores indicó metanogénesis. La intensidad del pulso hidrológico se relacionó con el registro estratigráfico del rizoma de *Eichhornia crassipes*. Arena y grava sedimentaron bajo flujo turbulento cerca del tributario Quebradona, mientras el limo se cementó con arcilla en la zona léntica o con arena en caños de conexión. El viento sobre la lámina de agua somera favoreció la resuspensión y transporte del sedimento proveniente de los tributarios. Por esta razón, se propusieron tasas netas de sedimentación relativamente lentas en la boca de Quebradona (*ca.* 0,15 cm a⁻¹), caños (*ca.* 0,1 cm a⁻¹) y humedales temporales (*ca.* 0,05 cm a⁻¹). Además se constató que el sedimento del CHA exportó los productos de degradación de MO a la cuenca baja del Río San Jorge y la atmósfera.

----- **Palabras clave:** Humedal, pulso hidrológico, tributario, sedimento, estratigrafía, metanogénesis, *Eichhornia crassipes*

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 65 68, correo electrónico: afruaca@gmail.com (A. Rúa)

Abstract

The hydrological pulse and matter transfer between tributaries and wetlands link terrestrial and rheotrophic environments. The water-sediment interaction on multidecadal scale within wetlands of Colombian Atlantic savannahs remains greatly unknown. This study stratigraphically correlated nine sediment cores (13-30 cm) spanning *ca.* 110-600 years BP from the Ayapel Flood Plain Lake (AFPL). These correlations framed (i) zones of high anthropogenic pressure, (ii) main hydrodynamics, and (iii) organic matter (OM) contributions. More than 84% out of the 150 km²-extension of the AFPL was comprised of oxic mineral sediment that is object to early diagenesis. In contrast, methanogenesis was evinced by reduced sediment of anaerobic strata in adjacent marshes. The intensity of the hydrological pulse matched the stratified deposit of the rhizome from *Eichhornia crassipes*. Whereas sand and gravel were deposited under turbulent flow near the Quebradona tributary, clayish silt deposited at pelagic zones and sandy silt at waterways. The wind drag on the shallow-water surface enhanced resuspension and transport of the sediment that was originally contributed by fluvial inputs. Thus, relatively slow net sedimentation rates were proposed at Quebradona's mouth (*ca.* 0.15 cm a⁻¹), channels (*ca.* 0.1 cm a⁻¹) and temporal marshes (*ca.* 0.05 cm a⁻¹). In addition, the sediment of the AFPL exported the degradation products of the OM to the lower reaches of the San Jorge River and the atmosphere.

Keywords: Flood Plain Lake, hydrological pulse, tributary, sediment, stratigraphy, methanogenesis, *Eichhornia crassipes*

Introducción

Los humedales son ecosistemas estratégicos ecológica y socialmente ya que actúan como reguladores del ciclo hidrológico y constituyen una fuente importante de bienes y servicios para la subsistencia de las poblaciones aledañas. Son fuente y sumidero de sedimento, materia orgánica (MO) y nutrientes, lo que aunado a su gran diversidad de hábitat y alimento en forma de plancton [1], los hace adecuados para el establecimiento de numerosas agrupaciones y comunidades biológicas. Estos ecosistemas abiertos reciben energía continuamente en forma de MO producida dentro del cuerpo de agua e importada desde la zona de transición acuático-terrestre [2]. Dicha MO autóctona y alóctona tiende a acumularse en el sedimento, lo cual implica que el análisis físico-químico del perfil sedimentario permitiría establecer el origen de los materiales y reconstruir los cambios ambientales

ocurridos en el cuerpo de agua o en cuencas aportantes [3].

Las llanuras de inundación son sistemas complejos y dinámicos de humedales que oscilan periódicamente entre la fase terrestre y acuática intercambiando sedimento constantemente entre sus caños de irrigación y zonas inundables [4]. El sedimento y sus constituyentes son reciclados e incorporados a la columna de agua durante la variación de nivel [2], debido, entre otros factores, al aumento en las tasas de liberación de materiales desde el sedimento tras el pulso de inundación [5]. El aumento en la carga interna de nutrientes, MO y materia inorgánica de diferentes orígenes en sedimento no consolidado contribuye a la eutrofización y contaminación de estos cuerpos de agua.

La relación entre la hidrología y los patrones de sedimentación del CHA ha sido investigada

sólo en sedimento superficial, encontrándose que este complejo de humedales actúa como una trampa de sedimentos, con una lenta tasa neta de depositación de material suspendido lavado desde el fondo durante aguas altas en descenso [6]. En adición, el presente estudio interpreta bajo qué dinámicas se dispuso el sedimento en el CHA a través del análisis de la estratigrafía del perfil de sedimento. Además, evalúa la correspondencia litológica espacial de nueve sitios de muestreo con patrones hidrológicos contrastantes.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El CHA se localiza en el municipio de Ayapel, al Oriente del departamento de Córdoba, entre las coordenadas $8^{\circ}4' - 8^{\circ}3' N$ y $75^{\circ}48' - 75^{\circ}20' W$ y entre 22-110 msnm. Esta zona corresponde a un bosque húmedo tropical enmarcado por sabanas y llanuras de inundación con temperaturas entre $26-28,7^{\circ}C$ [7], régimen pluviométrico monomodal, cuyo período de lluvias se concentra entre abril y noviembre, precipitación media de $3\ 700\ mm\ a^{-1}$ y 50-90% de humedad relativa [6].

Además del cuerpo de agua principal, la llanura de inundación se presenta como un conjunto de canales interconectados con humedales menores y zapales de diversa extensión, altamente variables en el tiempo, con cobertura parcial de macrófitas flotantes y vegetación temporal o permanentemente inundada arraigada en el fondo [6].

Este complejo de humedales es relativamente somero, con profundidad media de 2,06 m. Sin embargo, el pulso hidrológico induce amplias variaciones temporales. El espejo de agua oscila entre 20-150 Km^2 y su sistema hidrológico recoge el aporte de las quebradas de las zonas oriental y sur: Quebrada Quebradona, Quebrada Escobilla, Caño Barro y Caño Muñoz, entre otras (figura 1). Su principal nexo hidrológico es el Río San Jorge, al cual se conecta a través del Caño Grande. La profundidad del humedal durante aguas altas es *ca.* 3 m alcanzando hasta 8 m en las zonas más profundas. En contraste, en el periodo seco algunas zonas alcanzan niveles $<1\ m$, por lo que el viento mezcla completamente la columna de agua [6].

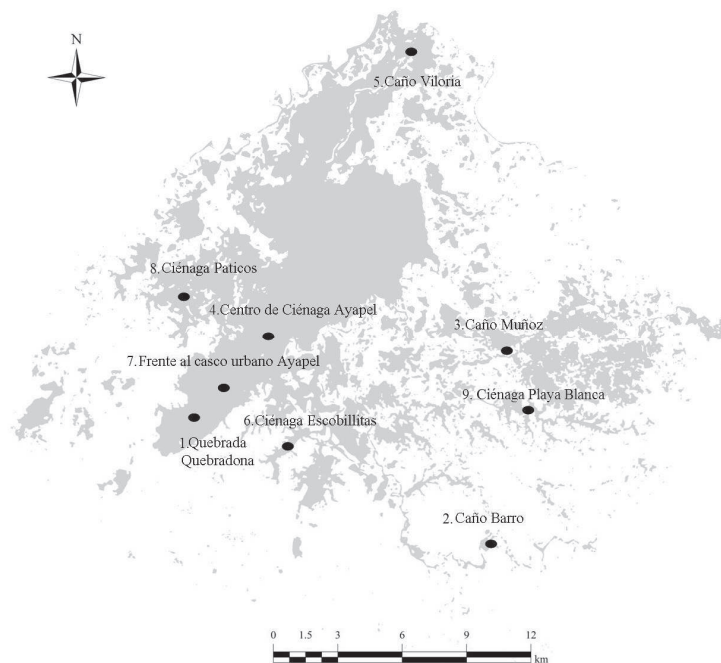


Figura 1 Ubicación espacial de las estaciones de muestreo de sedimentos dentro del complejo de humedales de Ayapel

En cuanto a su geología, el área de interés se encuentra dentro del Cinturón de San Jacinto del cual hace parte el Grupo Sincelejo, que a su vez consta de secuencias de ambientes transicionales a continentales, compuestas principalmente por areniscas, conglomerados arenosos y limos que descansan sobre la Formación Cerrito [8]. La geología local corresponde a Depósitos Cuaternarios aluviales de los ríos San Jorge y Cauca y ciénagas adyacentes conformados principalmente por arcilla, limo arenisca y conglomerados fluvio-lacustres no consolidados [6].

Trabajo de campo

Se extrajeron nueve núcleos de sedimento de los principales afluentes y el canal de drenaje del CHA (figura 1 y tabla 1) empleando un nucleador de gravedad Uwitec en diciembre de 2006. Cada núcleo fue fraccionado inicialmente en dos o tres estratos a los que se les determinó espesor, color, textura, estructura, presencia de MO en descomposición, carbón vegetal, entre otras características físicas. Dichas submuestras fueron refrigeradas desde su recolección hasta el análisis en el laboratorio.

Tabla 1 Estaciones de perforación para la caracterización litológica de los sedimentos del complejo de humedales de Ayapel, Córdoba

Estación	Ubicación	Coordenadas		Descripción
		N	W	
1	Boca Quebradona	8°17'31,2"	75°09'01,0"	Caño de entrada
2	Caño Barro	8°17'10,2"	75°03'48,5"	Caño de entrada
3	Caño Muñoz	8°19'33,33"	74°59'56,6"	Caño de entrada
4	Centro de Ciénaga Ayapel	8°18'21,9"	75°06'57,4"	Ciénaga de Ayapel
5	Caño Viloría	8°25'14,6"	75°04'14,3"	Canal de drenaje
6	Ciénaga Escobillitas	8°17'18,6"	75°05'37,9"	Humedal menor
7	Frente al casco urbano Ayapel	8°18'57,3"	75°07'34,5"	Ciénaga de Ayapel
8	Ciénaga Paticos	08°21'47,6"	75°07'09,8"	Humedal menor
9	Ciénaga Playa Blanca	8°17'59,8"	75°59'50,8"	Humedal menor

Procesamiento de la información

Se realizaron tres correlaciones estratigráficas entre sitios agrupados de acuerdo con características comunes. En primer lugar, se correlacionaron sitios que han sufrido gran deterioro ambiental debido a la presión antrópica: 1, 2, 3, 4, 6, 8 y 9. En la segunda, se compararon los sitios ubicados sobre la línea de flujo preferente dentro del cuerpo de agua principal del CHA: 1, 4, 5 y 7. Por último, se compararon los perfiles 6 y 8, zonas históricamente afectadas por el ingreso de agentes contaminantes biodegradables y no biodegradables.

Resultados y Discusión

Descripción de los núcleos de sedimento

El espesor de las perforaciones fue de 30 cm, a excepción de las estaciones 1, 4 y 8, en las cuales la rápida corriente o escasa profundidad de la tabla de agua impidieron recuperar perfiles completos. Los nueve perfiles correspondieron a sedimento mineral proveniente de la dinámica propia de la cuenca y en menor proporción, de la biota y vegetación de borde y zonas someras. El sedimento extraído del CHA fue principalmente

limo en contacto erosivo con arcilla, rico en espículas de esponjas, con diatomeas, fitolitos, MO particulada y amorfa, sin bioturbación ni sapropel. Grumos, fibras orgánicas y arena

definieron también las subunidades litológicas, cuyo tamaño medio de grano aumentó hacia el presente (figura 2). Es importante señalar que el sedimento no fue datado.

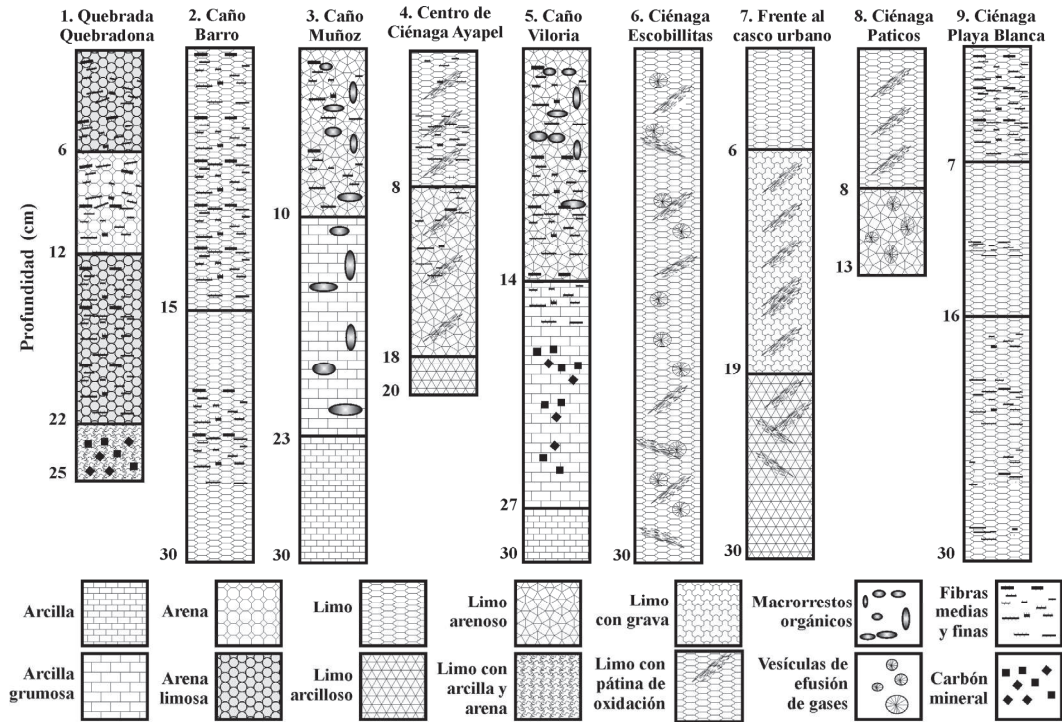


Figura 2 Perfiles litológicos de los sedimentos colectados en el complejo de humedales de Ayapel

Las fibras medias y finas presentes en la mayoría de los perfiles correspondieron a rizoma en descomposición de macrófitas flotantes que sedimentaron bajo reología laminar durante el estiaje (figura 2). Después fueron cementadas tras la precipitación de sólidos suspendidos en sitios aislados hidrodinamicamente por desecación de cauces. La disposición de estas raíces en el perfil 1 (Quebrada Quebradona) fue caótica en comparación con la de los humedales menores y demás caños, en concordancia con mayores velocidades de circulación características de afluentes. El aumento en la proporción generalizada de limo a expensas de la contribución de arcilla en los estratos superiores de los perfiles correspondió a mayor energía hidrodinámica en el

presente, incluso en humedales menores y caños de conexión con el espejo de agua principal. La tasa de sedimentación fue influenciada a su vez por el movimiento vertical de agua asociado al pulso hidrológico.

Correlaciones estratigráficas

Área de mayor influencia antrópica

La capa limoarenosa intermedia inferior (8-18 cm) del perfil 4 se correlacionó con el estrato superior del perfil 3, en el que se hallaron fitoclastos carbonatados en descomposición (figura 3). La rápida acreción lateral del Caño Muñoz sugerida por la heterogeneidad del perfil

3 (figura 3) concuerda con la avulsión del Río Cauca hacia el oriente ocasionada por altas tasas de sedimentación [9]. La arcilla del perfil 3 sugirió que los perfiles 2, 6 y 9 (figura 3) también reposan sobre arcilla Cuaternaria considerablemente hundida por actividad tectónica [10]. De otro lado, el limo de las estaciones 2 y 9 se alternó con rizomas y otros macrorestos en descomposición de macrófitas flotantes, comunes en ciénagas y pantanos tropicales colombianos [11]. La presencia de fitoclastos y macrorestos en proceso de descomposición y humificación podría indicar su sedimentación reciente. Adicionalmente, el aporte fluvial fue insuficiente para evitar desecación parcial alrededor de las estaciones 2, 6 y 9 durante aguas bajas (figura 1), periodo en

el cual, grandes parches de macrófitas flotantes (*e.g. Eichhornia heterosperma* y *E. crassipes*) fueron aislados del espejo de agua principal en las estaciones 2 y 9 e importados al sustrato. Esta alta carga de MO aumentó la demanda béntica ocasionando anoxia temporal. En concordancia, el tono gris-gris oliva del limo en los perfiles 2 y 9 sugirió ocurrencia de formas reducidas de hierro (figura 2), mientras las pátinas negras en los estratos recientes del perfil 9 sugirieron presencia de óxido de manganeso. Por su parte, las abundantes fibras en descomposición que acompañaron este limo fétido incluso a profundidades >20 cm, indicaron escaso valor nutricional y condiciones reductoras hacia la base del perfil 9.

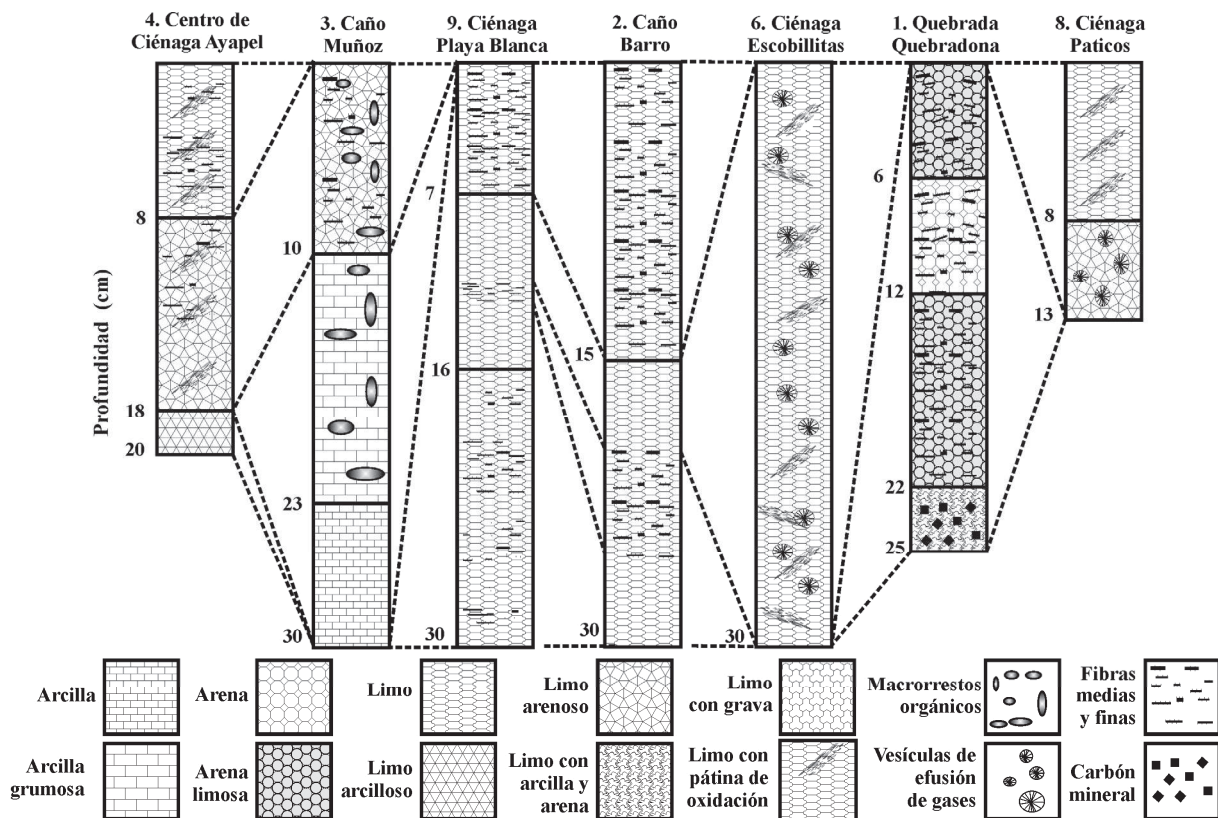


Figura 3 Correlación estratigráfica entre los perfiles del área de mayor influencia antrópica en el complejo de humedales de Ayapel

Si la cobertura de *E. crassipes* en el CHA es proporcional al aporte fluvial [12], entonces la abundancia de raíces de *E. crassipes* en el perfil de sedimento de Ayapel puede considerarse un proxy para la intensidad del pulso hidrológico. El incremento en la frecuencia de eventos de precipitación extrema del neotrópico durante las últimas décadas [13], el aumento *ca.* 1 m del nivel limnimétrico actual del CHA [14] y la notable acumulación de rizoma en los estratos limo-fibrosos recientes (figura 3) ponderaron esta hipótesis.

En línea con este razonamiento, el limo fibroso de los perfiles 2 y 9 se correlacionó cronológicamente, *i.e.* la tasa de sedimentación en el sitio 2 duplicó la de 9, de cuya estratigrafía se infirió periodicidad en los pulsos hidrológicos más intensos. Según el análisis de series de tiempo de precipitación, dicha periodicidad en la cuenca San Jorge-Cauca-Magdalena es del orden de 150, 250, 350, 500, 600 y 1 100 a [15], implicando una edad *ca.* 600 a del perfil 9 (Playa Blanca) basados en su frecuencia estratigráfica de rizoma de macrófitas flotantes.

De otro lado, la aireación del hipolimnion en las estaciones pelágicas 4 y 7 durante el estiaje y aguas altas fue considerable. El color rojizo de los perfiles 6 y 8, y de los techos de 4 (0-8 cm) y 7 (0-6 cm) antes y después de la ignición sugirió presencia de óxido férrico (Fe_2O_3) hidratado [16]. Es decir, estas subunidades litológicas fueron óxicas y probablemente objeto de diagénesis temprana, lo cual debe probarse midiendo la distribución vertical de Hg y Fe o Cu en los perfiles. Finalmente, las vesículas en los perfiles 6 y 8 fueron producidas por intercambio gaseoso sedimento-agua (*cf.* Vertimientos).

Línea preferente de flujo

El aluvión explotado para construcción o material de playa en la cuenca media de Quebradona sedimentó en forma de arena en la vecindad del perfil 1 (figura 4). En contraste, es probable que los trozos de carbón en la base del perfil 1 se originaran en la quema de vegetación *ca.*

110 a BP, *i.e.*, la tasa de sedimentación en la confluencia de la Quebrada Quebradona con el espejo de agua principal sería *ca.* 0,15 cm a⁻¹, en comparación con 0,38 cm a⁻¹ del Río Magdalena [17]. Por su parte, la ausencia de correlación estratigráfica entre los perfiles 1 y 7 evidenció que el primero se encuentra a una mayor altura sobre el nivel del mar y están asociados a reoambientes contrastantes, *viz.* lótico y léntico.

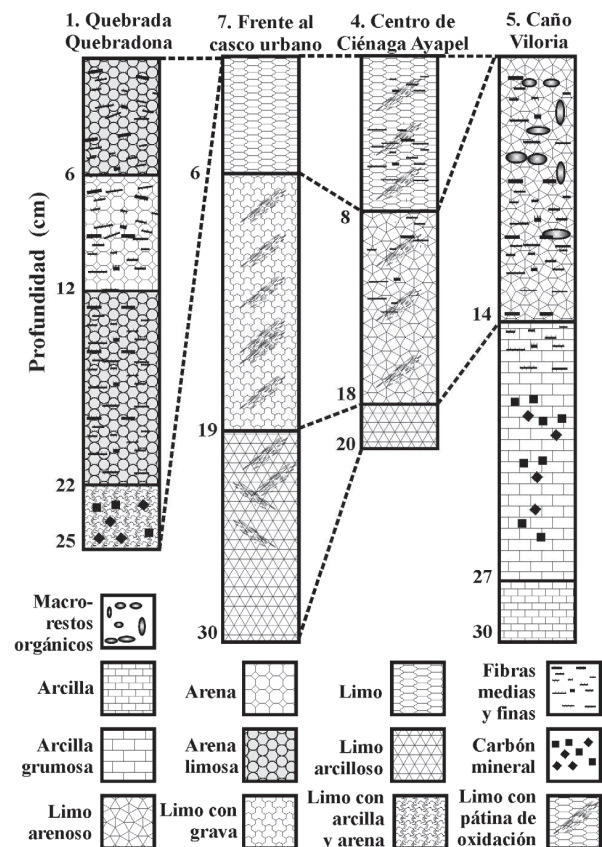


Figura 4 Correlación estratigráfica entre los perfiles de las estaciones ubicadas sobre la línea preferente de flujo en el complejo de humedales de Ayapel

El limo del techo y el limo arcilloso de la base en los perfiles 4 y 7 se correlacionaron (figura 4). La granulometría del sedimento disminuye con la distancia que es transportado [18], por lo cual la arena y grava en el estrato central de los perfiles 4 y 7 sedimentaron bajo flujo turbulento en dirección sur-norte, atribuible al modo de circulación preferente a lo largo del eje conformado por las

estaciones 1, 4, 5 y 7 (figura 1). Sin embargo, el ciclo hidrológico y el viento invierten la dirección del flujo de agua [19]. De otro lado las pátinas de oxidación en algunos estratos de los perfiles 4 y 7 fueron posiblemente resultado de la acción del viento en la zona abierta de la Ciénaga de Ayapel, que mezcló completamente la columna de agua y transportó O₂ hasta el fondo.

Aunque la distancia entre la estación 4 y la 5 es *ca.* 20 km, el limo arenoso del estrato central (8-18 cm) del perfil 4 y el techo (0-14 cm) del perfil 5 se correlacionaron (figura 4). La estación 5 está ubicada sobre el canal de exportación de nutrientes del CHA hacia la región de la Mojana Sucreña y en consecuencia, la proporción de fibras y otros macrorestos en este núcleo fue la mayor y los restos de carbón hacia su base correspondieron a una porción del carbón exportado desde el CHA hacia el Río San Jorge.

Vertimientos

Los 13 cm del perfil 8 limitaron la información histórica ambiental del humedal Paticos (figura 5). Sin embargo, este perfil presentó características estratigráficas interesantes y se correlacionó con el perfil 6 (figura 5). Este último presentó cambios leves de textura *ca.* 5 cm a pesar de su aparente uniformidad. Ambos perfiles presentaron vesículas profundas y alargadas con diámetro ≤ 1 cm moldeadas por la efusión presumible del CH₄ producido en condiciones reductoras en estratos más profundos.

Aunque la interfase agua sedimento del humedal Paticos es hipóxica en las noches de máxima precipitación (agosto) [20], la penetración de O₂ en el sedimento fue ≤ 8 cm en el perfil 8 y ≥ 30 cm en el perfil 6 durante aguas altas (diciembre) de acuerdo con la profundidad de ocurrencia de pátinas de oxidación (figura 5). La oxidación del perfil 6 fue atribuible al transporte continuo de O₂ desde la columna de agua al sedimento, mientras que la del perfil 8 se debió a la exposición del sustrato a la atmósfera durante aguas bajas. Adicionalmente, la MO en las aguas servidas del municipio de Ayapel fue transformada vía

respiración intensa en el sedimento reciente del sitio 8 y por medio de anaerobiosis en estratos sepultados en niveles anóxicos.

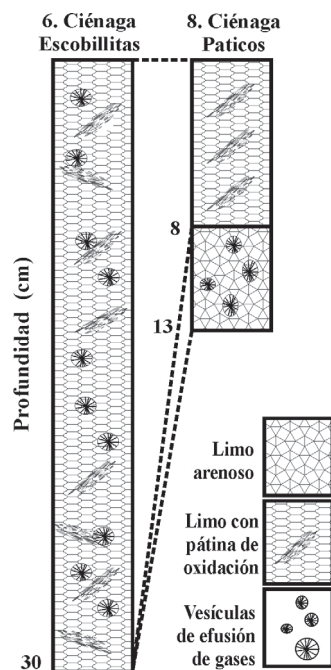


Figura 5 Correlación estratigráfica entre dos perfiles de sitios afectados por la descarga de aguas residuales de origen doméstico en el complejo de humedales de Ayapel

Conclusiones

El complejo de humedales de Ayapel (CHA) es una llanura de inundación reotrófica alimentada principalmente por la Quebrada Quebradona y el Río San Jorge. El estiaje reduce el espejo de agua, área transversal de caños y nivel limnimétrico, resultando en el aumento concomitantemente de la velocidad de drenaje y el transporte de grava y arena dentro de su cuerpo de agua principal, lo que modifica la estratigrafía de sus sedimentos. De esta forma, la velocidad de la corriente clasificó la granulometría de los sitios muestreados a lo largo del eje preferente de flujo de agua en dirección S-N en el orden descendente: 1 > 7 > 4 > 5.

Los tributarios, caños de conexión y humedales adyacentes presentaron diferencias contrastantes

en estratigrafía y tasas de sedimentación dependientes de la reología y la subsidencia. La arena del perfil 1 reflejó la condición lítica en la confluencia Quebrada-Ciénaga, mientras el limo arenoso correspondió a ambientes de intercambio de flujo o caños y el limo predominó en humedales menores. Adicionalmente, la tasa de sedimentación en tributarios (*ca* 0,15 cm a⁻¹) superó la de caños (*ca* 0,1 cm a⁻¹) y humedales menores (*ca* 0,05 cm a⁻¹).

Una superficie *ca.* 86 % del sedimento reciente del CHA fue oxidado y mineralizado tras su exposición periódica a la atmósfera en aguas bajas. Adicionalmente, la acción del viento oxidó estratos ≤ 30 cm de sedimento mineral en zonas someras permanentemente inundadas (Humedales Paticos y Escobillitas). Sin embargo, la interfase agua-sedimento de sitios hidrodinámicamente aislados (Caño Barro y Playa Blanca) presentó condiciones reductoras transitorias a óxicas en aguas altas, atribuibles al restablecido nexo hidrológico y suministro de O₂.

Los nutrientes acumulados en estratos de sedimento ≤ 30 cm en los humedales Escobillitas y Paticos fueron transformados mediante metanogénesis, cuyos productos de degradación se difundieron a través de estructuras vesiculares.

El CHA exportó nutrientes a través del Río San Jorge en forma de macrófitas flotantes y a la vez los importó al sedimento en humedales menores aislados, su canal de drenaje y caños de conexión durante la transición a período seco.

Se recomienda el análisis de metales pesados de interés sanitario (Hg) y ambiental (Fe o Cu) para probar la hipótesis de diagénesis temprana en el sedimento anastómico de la sabana atlántica colombiana.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el programa de sostenibilidad 2011/2012 de la vicerrectoría de investigación de la Universidad de Antioquia.

Los autores manifiestan su agradecimiento a la Corporación Autónoma Regional de los valles del Sinú y del San Jorge (CVS), a la Corporación para el Desarrollo Integral de la Ciénaga de Ayapel (Corpoayapel) y al grupo de investigación en gestión y modelación ambiental (GAIA) de la Universidad de Antioquia, especialmente a la M.Sc. H. Grajales por su ayuda en el mejoramiento de versiones previas de este manuscrito.

Referencias

1. L. Gallo, N. Aguirre, J. Palacio. "Zooplankton (Rotifera y Microcrustacea) y su relación con los cambios del nivel de agua en la ciénaga de Ayapel, Córdoba, Colombia". *Caldasia*. Vol. 31. 2009. pp. 339-353.
2. R. Wetzel. *Limnology: Lake and river ecosystems*. 3ª ed. Ed. Academic press. San Diego, USA. 2001. pp. 1006.
3. I. Foster, D. Walling. "Using reservoir deposits to reconstruct changing sediment yields and sources in the catchment of the Old Mill Reservoir, South Devon, UK, over the past 50 years". *Hydrol. Sci. J.* Vol. 39. 1994. pp. 347-368.
4. P. Moreira, J. Jouanneau, B. Turcq, P. Seyler, O. Weber, J. Guyot. "Carbon sedimentation at Lago Grande de Curuai, a floodplain lake in the low Amazon region: Insights into sedimentation rates". *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* Vol. 214. 2004. pp. 27-40.
5. A. Fabre. "Experimental studies on some factors influencing phosphorus solubilization in connection with the drawdown of a reservoir". *Hydrobiol.* Vol. 159. 1988. pp. 153-158.
6. GAIA-CVS. *Plan de manejo ambiental del complejo de humedales de Ayapel*. Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, Corporación Académica Ambiental, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2007. pp. 421.
7. IGAC. *Estudio general de los suelos de los municipios de Ayapel, Buenavista, Planeta Rica y Pueblo Rico (Departamento de Córdoba)*. 1ª ed. Ed. Agustín Codazzi. Bogotá. 1986. pp. 282.
8. H. Duque. "Structural style, diapirism and accretionary episodes of the Sinú-San Jacinto terrane, southwestern Caribbean borderland". *Geol. Soc. Amer. Mem.* Vol. 162. 1984. pp. 303-316.
9. D. Smith. "Anastomosing river deposits, sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena River,

- northwestern Colombia, South America". *Sediment. Geol.* Vol. 46. 1986. pp. 177-196.
10. W. Tanner. "The incomplete flood plain". *Geol.* Vol. 2. 1974. pp. 105-106.
 11. Y. Montoya, N. Aguirre. "Estado del arte de la limnología de lagos de planos inundables". *Gest. Ambient.* Vol. 12. 2009. pp. 85-106.
 12. S. Villabona, N. Aguirre, A. Estrada. "Influencia de las macrófitas sobre la estructura poblacional de rotíferos y microcrustáceos en un plano de inundación tropical". *Rev. Biol. Trop.* Vol. 59. 2011. pp. 853-870.
 13. E. Shamir, K. Georgakakos, M. Murphy. "Frequency analysis of the 7-8 December 2010 extreme precipitation in the Panama canal Watershed". *J. Hydrol.* Vol. 480. 2013. pp. 136-148.
 14. E. Hernández, N. Aguirre, J. Palacio, J. Ramírez. "Variación espacio-temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia." *Actual. Biol.* Vol. 30. 2008. pp. 67-81.
 15. T. van der Hammen, A. Cleef. "Holocene changes of rainfall and river discharge in Northern South America and the El Niño phenomenon". *Erdkd.* Vol. 46. pp. 252-256.
 16. K. Reddy, R. DeLaune. *Biogeochemistry of wetlands: science and applications*. 1ª ed. Ed. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Ratón, USA. 2008. pp. 774.
 17. Anonymous. "How are rates of geological processes measured and expressed?". *Earth-Sci. Rev.* Vol. 28. 1990. pp. 10-258.
 18. M. Tucker. *Techniques in sedimentology* 1ª ed. Ed. Blackwell Science. London, England. 1988. pp. 408.
 19. A. Wills. *Estudio hidrológico de la Ciénaga de Ayapel*. Tesis de Doctorado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2013.
 20. Y. Montoya, N. Aguirre. "Cambios nictemerales de variables físicas y químicas en la Ciénaga de Paticos, complejo cenagoso de Ayapel, Colombia". *Rev. Biol. Trop.* Vol. 57. 2009. pp. 635-646.