



This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Manuscrito recibido: Agosto 29, 2023

Revisión recibida: Octubre 11, 2023

Aceptado: Noviembre 6, 2023

Publicado en línea: Noviembre 13, 2023

*Research article*

## Sensores paleoclimáticos del último milenio preservados en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Colombia

Paleoclimatic sensors of the last millennium preserved in the sediments of the Pantano La Bramadora, Sopetrán, Colombia

María Teresa Flórez Molina<sup>1</sup>✉, Luis Norberto Parra Sánchez<sup>2</sup>✉; Gonzalo Abril Ramírez<sup>2</sup>✉; Carlos Albeiro Monsalve-Marín<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup>Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia

<sup>3</sup>Investigador independiente, Medellín, Colombia

### RESUMEN

La estratigrafía del “Pantano La Bramadora”, de base a techo (1015-2022, años calendario (AC)), comprende un set de paleosuelos intercalados con arcillas y turbas. En la base, un conjunto de paleosuelos terrestres desarrollados sobre una llanura aluvial de régimen torrencial; el más profundo, evolucionó bajo condiciones de extrema aridez (*Xeric argigypsids*). Supra yaciendo estos, condiciones climáticas más favorables permitieron la formación de paleosuelos terrestres intercalados con arcillas palustres (1050 a 1170 AC). El año calendario 1050 AC marca el desarrollo permanente del pantano que se formó a partir de un abanico torrencial transversal al valle principal, que ocasionó el represamiento del agua, sepultó los paleosuelos terrestres inferiores y dejó una lámina de agua persistente, como lo evidencia estratos de arcilla bandeada laminada gris-azulosas, gris-verdosas y chocolate. Estas condiciones persistieron hasta 1795 AC. Inmersos en este periodo, dos paleosuelos “mellizos” separados por una estrecha capa de arcilla indican la desaparición de la lámina de agua por una fuerte sequía entre 1324 y 1338 AC. Durante 1796 y 1882 AC dominan arcillas chocolate, el nivel freático es rasante y la vegetación herbácea; mientras que, entre 1882 y 2022 AC es imperioso un pantano arbóreo que enriquece los sedimentos con fibras. El nivel freático por debajo de la superficie, persistente buena parte del año, y la evapotranspiración controlan todo el sistema. La lito-tefro-pedo-quimio estratigrafía y el LOI - sensores paleoclimáticos- definen la presencia de sedimentos, paleosuelos y ambientes. N14 se configura como un excelente registro paleoclimático en el trópico para el último milenio.

**Palabras clave:** Climas estacionalmente contrastados, llanura aluvial, régimen torrencial, pantano de hierbas, pantano arbóreo.

### ABSTRACT

The stratigraphy of the “Pantano La Bramadora”, from base to roof (1015-2022, calendar years (AC)), comprises a set of paleosols interspersed with clays and peats. At the base, a set of terrestrial paleosols developed on a torrential alluvial plain; the deepest, evolved under conditions of extreme aridity (*Xeric argigypsids*). Above these, more favorable climatic conditions allowed the formation of terrestrial paleosols interspersed with palustrine clays (1050 to 1170 AC). The calendar year 1050 marks the permanent development of the swamp, which was formed from a torrential fan transverse to the main valley, which caused the damming of water, buried the lower terrestrial paleosols, and left a persistent sheet of water, as evidence of bands of gray-blue, gray-green and/or chocolate banded and/or laminated clay; these conditions persisted until 1795 AC. Immersed in this period, two “twin” paleosols, separated by a narrow layer of clay, indicate the disappearance of the water sheet due to a strong drought between 1324 and 1338 AC. During 1796 and 1882 AC, chocolate clays dominate, the water table is level, and the vegetation is herbaceous, while, between 1882 and 2022 AC, a tree swamp is imperative that enriches the sediments with fibers. The water table below the surface, persistent for much of the year, and evapotranspiration control the entire system. Litho-tephro-pedo-chemo-stratigraphy, and the LOI, paleo climatic sensors, define the presence of sediments, paleosols and environments. N14 is configured as an excellent paleoclimate record in the tropics for the last millennium.

**Keywords:** Seasonally contrasting climates, alluvial plain, torrential regime, herbal swamp, arboreal swamp

**Citación:** Flórez Molina, M.T., Parra Sánchez, L.N., Abril Ramírez, G. y Monsalve Marín, C.A. (2023). Sensores paleoclimáticos del último milenio preservados en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Colombia. Boletín Geológico, 50(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.50.2.2023.711>

## 1. INTRODUCCIÓN

El Pantano La Bramadora en Sopetrán, Antioquia, Colombia, como lo indica Flórez *et al.* (2023), está sometido a un régimen de torrencialidad, que ha permitido la acumulación de, por lo menos, 950 cm de sedimentos arcillosos que están mediados por paleosuelos muy espesos en el techo y en la base, dos leves discordancias estratigráficas, y muy cerca de la parte media de esta serie pedo-sedimentaria, un par de paleosuelos “mellizos” separados por una delgada capa de arcillas.

Por el interés que revisten estos dos núcleos (N13 y N14), se planteó la necesidad de ver si ellos albergaban evidencias de eventos de precipitación acaecidos en la cuenca, al menos, durante el último milenio. Para ello se decidió estudiar el N14 y dejar como testigo el N13. Definiendo como objetivo central la búsqueda de sensores paleoclimáticos que reflejarán y explicarán dichos eventos, se logró, a través de la lito, tefro (criptotefras), así como en la pedo y en la química estratigrafía, hallar excelentes sensores que no solo llevaron a la resolución del objetivo sino que precisaron la presencia de eventos volcánicos globales y locales, de precipitación, de sequía, y dieron respuestas sobre la formación del depósito pedo sedimentario del Pantano La Bramadora, con lo cual, se pudo reconstruir los diversos ambientes sedimentarios preservados en él. La tasa de sedimentación media (1cm/año), representa un periodo de acumulación por erosión pluvial, entre 2022 y 1015 AC, facilita tener claridad sobre las condiciones paleoclimáticas ocurridas, por lo menos, en los últimos 1000 años AC, en dicha cuenca.

Este registro pedo sedimentario guarda evidencias de eventos de precipitación que podrían estar correlacionados con eventos volcánicos globales y locales: las actividades volcánicas del Pinatubo en 1991, Quizapu en 1932, Tambora en 1815, Ruíz en 1805, Huaynaputina en 1600 y Ruíz en 1605, 1595, 1527 y 1524, entre otros. La persistencia y constancia en la tasa de sedimentación fue contundente en la definición del tiempo calendario; por ejemplo, los excesos de pluviosidad global en 1816, ocasionados por aerosoles volcánicos de la explosión del Tambora en 1815. En 1800, el Mínimo Dalton entendido como debilidad solar; entre 1500 y 1720, el registro de la Pequeña Edad de Hielo (LIA); entre 1200-1450 el Calentamiento Medioeval (dentro de este periodo se encuentran los paleosuelos “mellizos” descrito aquí; además, Plazas *et al.* (1993) le atribuyen el decaimiento de la cultura Zenú en Colombia, y el Calentamiento moderno que coincide con numerosos periodos de sequía (eventos Niño) y/o de lluvias extremas (eventos Niña) ocurridos en el mundo y en Colombia, eventos extremos de precipitación quedan como registro a través de la

presencia de espesos bancos de arcillas bandeadas y/o laminadas y laminadas presentes en el Pantano La Bramadora.

Estudios sobre el paleoclima en sedimentos lacustres u otros registros a escala anual o subanual, realmente son pocos en todo el mundo y en Colombia solo se empiezan a realizar; sin embargo, algunos autores plantean importantes aportes sobre el potencial del registro sedimentario dado que ellos proporcionan una serie de datos ambientales que actúan como sensores de medición del clima que podrían indicar algunas causas y consecuencias del cambio climático (Lorius *et al.*, 1992, Mayewski, 2008, IPCC, 2007, 2014, Betancurth y Cañón, 2021 ). Tal como lo afirma Gornitz (2009), comprender y evaluar climas pasados es un desafío para la ciencia por lo complejo del tema. Al respecto, se resalta el trabajo de Luque (2003), en el Lago Sanabria, Península Ibérica, región geográfica cuyo régimen de precipitaciones está determinado por las fases negativas y positivas de la NAO (*North Atlantic Oscillation*).

En este estudio se reconstruyó la evolución paleo ambiental durante el Holoceno, a través de la paleo limnología y la sedimentología de alta resolución y el autor indica que la cantidad de materia orgánica entrada al sistema lacustre por escorrentía está determinada por el régimen de precipitaciones de la región. En su opinión, el lago se comporta como un sensor de las variaciones acontecidas tanto a escala regional (clima de la región del Atlántico Norte) como a escala local (fenómenos catastróficos ocurridos en su cuenca hidrográfica); el análisis *Loss on ignition* (LOI) representa el contenido en materias volatilizables a 550°C en el sistema sedimentario del lago y constituye un indicador paleo ambiental. En su trabajo destaca varios ciclos sensibles al cambio climático: 1) El de 1500 detectado en el Atlántico Norte, 2) la tendencia de enfriamiento o ciclo de Bond, 3) el periodo climático Medieval *Period - Little Ice Age* (MWP-LIA), 4) los ciclos de 300-311 años y 456 años, 5) el ciclo solar de Gleissberg, 6) los mínimos solares, y 7) las avenidas torrenciales de la propia cuenca. Concluye que existe una correlación significativa entre el contenido de materia orgánica (MO) del sedimento y el registro de 14C atmosférico y que las oscilaciones de la MO podrían estar moduladas por la actividad solar. Finalmente, plantea que estos ciclos climáticos, podría suponer condiciones climáticas frías en el 2100-2150 AC, y que el calentamiento actual de la Tierra no está siendo determinado únicamente por la acción del hombre, sino que también está actuando una tendencia climática natural ya existente.

León (2020) afirma que para América Latina es desafortunado el panorama sobre el estudio del cambio climático a escala anual o subanual en sedimentos lacustres, al menos para el último milenio. Resalta un estudio basado en dendrología, en la Patagonia, que indica que las temperaturas medias anuales para el Norte

y el Sur de la Patagonia durante el intervalo 1900 a 1990 son de 0,53°C y 0,86°C por encima de los medios de 1640 a 1899, respectivamente. En la Patagonia meridional, el año 1998 fue el más cálido de los últimos cuatro siglos. La tasa de aumento de la temperatura de 1850 a 1920 fue la más alta en los últimos 360 años (IPCC, 2014; Villalba *et al.*, 2003). Por lo tanto, el LIA y el Intervalo de Calentamiento Moderno se prueban evidentemente en este registro. Herrera y Del Valle (2011), con la dendrología reconstruyen los niveles del Bajo Atrato en Colombia y evalúan el efecto del ENSO en los últimos 146 años (1861-2006) empleando los anillos de crecimiento de *Prioria copaifera* (cativo), indican que dichos anillos permiten registrar las peores inundaciones sucedidas en la zona durante el periodo reconstruido.

Para abordar el objetivo planteado, además de la descripción del área desde la geología y la geomorfología, la obtención de dos núcleos de sedimentos del Pantano La Bramadora, se realizó la descripción estratigráfica del N14, teniendo en cuenta la litología, la presencia de criptotefras, de capas con líticos volcánicos, de paleosuelos, del suelo actual y de algunos rasgos importantes como la presencia de tres levas discordancias y especialmente se realizó la química elemental por XRF. Una vez fotografiado en detalle, se realizó la columna completa y se graficó en el Programa *Strater* (libre). El N14, fue seccionado al centímetro, obteniéndose 950 muestras para las descripciones de cada uno de ellos, realizar los análisis XRF respectivos y determinar las pérdidas por ignición (LOI (%)), y con ellas se construyeron las bases de datos, los respectivos análisis, las gráficas y los reportes.

Este artículo es el segundo resultado parcial de la investigación sobre reconstrucción del estado del agua en el humedal (en ejecución), tal como se hizo con el ya publicado Flórez *et al.* (2023); en este se presentan los sensores paleoclimáticos y se libera la matriz general con todos los datos de la química elemental.

## 2. MARCO GEOMORFOLÓGICO

El Pantano La Bramadora se ubica en las coordenadas 1.141.824,99 Este y 1.207.536,7 Norte, de la Vereda La Puerta, Municipio de Sopetrán, Antioquia, a 535 msnm (Figura 1). La Zona de Vida del sitio es Bosque Seco Tropical (Bs-T), de acuerdo con Espinal (1992), caracterizándose por contar con promedios de temperatura superiores a 24°C, precipitación total anual entre 800 y 1266 mm y relaciones de evapotranspiración potencial entre 0,8 y 2,0 (Consultoría Colombiana S.A., 2017). El Pantano se encuentra en la parte baja de la cuenca fluvial la cual se halla desarrollada sobre rocas sedimentarias de la Formación Amaga, Miembro Superior, en el Flanco Oeste del Sinclinal de Ahuyamal, donde dominan, areniscas y arcillolitas de colores

pardo a pardo rojizo, y espesos bancos de conglomerados con cantos redondeados heterométricos y heterogéneos soportados por una matriz areno limosa de color pardo rojizo. Existen zonas con regolitos de alteración de pocos metros de espesor desarrollados a partir de esas rocas sedimentarias (Flórez *et al.*, 2023).

toda la cuenca está sometida a un régimen de torrencialidad y al coluviamiento de materiales finos arrastrados por arroyadas difusas en las laderas o concentrada en los cauces dando origen a abanicos y piedemontes en la llanura aluvial. El Pantano la Bramadora de ubica justo en la parte distal de este valle coluvial y recibe tanto los flujos de agua subterráneos como los superficiales intermitentes que recorren estos valles de la cuenca (Flórez *et al.*, 2023).

## 3. MÉTODO

### 3.1 Trabajo de campo

Extracción de los núcleos de sedimentos. En este Pantano a 535 msnm de altitud y antes de realizar la recuperación de los núcleos se hicieron cinco sondeos con un punzón, en forma radial, separados cada uno aproximadamente por 5.0 m. Una vez seleccionado el sitio más profundo se limpió un área de aproximadamente 3.0 m de diámetro y se fijó una plataforma para la manipulación de la Sonda Rusa que extrae material en intervalos de 50 cm exactos, sin que estos se compriman o contaminen, ya que penetra hasta la profundidad requerida, corta y cierra herméticamente antes de su extracción (Moore *et al.*, 1991). Se recuperaron dos núcleos gemelos de sedimentos, los cuales alcanzaron el fondo a los 10 metros de profundidad y fueron nombrados como N13 y N14. El segundo núcleo (N14), se tomó con un desfase en superficie de 0.25 cm con el objeto de cubrir el traslape entre este y el núcleo N13. Una vez recuperados los núcleos se realizó la descripción de la estratigrafía de campo de cada uno. A este nivel, se pudo discriminar diversas capas inorgánicas y orgánicas con cambios de coloración, textura y estructura e incluso algunos segmentos dominados por fibras y abundante material vegetal. Cada vez que se extraía el intervalo de 50 cm de sedimentos se procedía a fotografiarlos y a empacarlos en tubos de PVC, cubrirlos con una membrana plástica y guardarlos en cajas de icopor con hielo seco para su traslado hasta el Laboratorio del Grupo GAIA, SIU-UdeA, para su descripción estratigráfica y posterior seccionamiento en rodajas de 1 cm (Flórez *et al.*, 2023).

### 3.2 Trabajo de laboratorio

Extracción de las muestras del núcleo de sedimento. Se tomaron dos núcleos nombrados como N13 (preservado como testigo), y N14 (para descripción y trabajo).

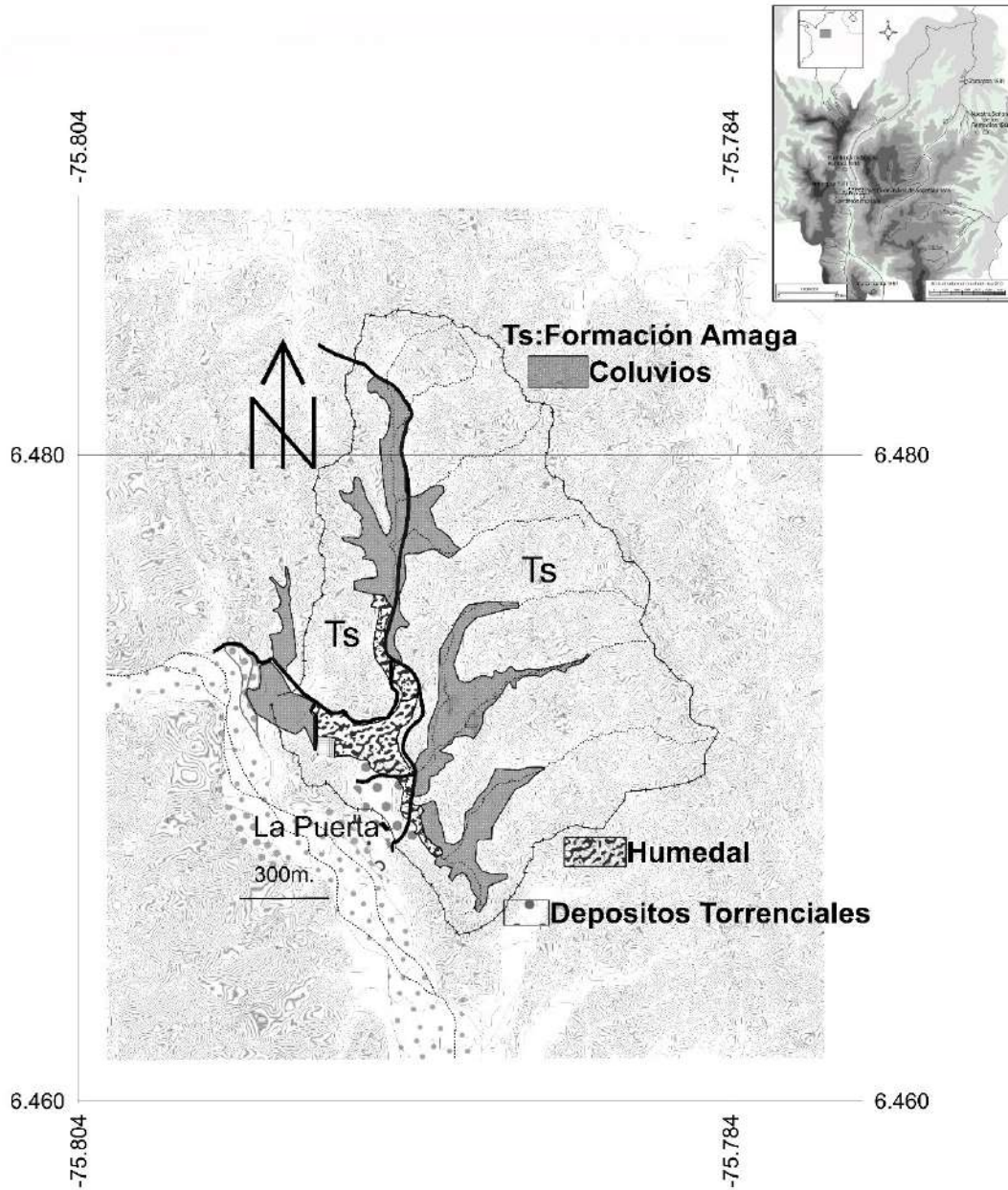


Figura 1. Localización del Pantano La Bramadora, Vereda La Puerta, Municipio de Sopetrán, Departamento de Antioquia, Colombia. Modificado de Flórez *et al.* (2023).

Cada porción de 50 cm del N14, fue destapado y descrito. Se determinó el color, la textura, la estructura, los rasgos más sobresalientes y se efectuaron los límites de capas o de paleosuelos. Cada 50 cm se describió tanto la litoestratigrafía como la pedoestratigrafía y se realizaron los respectivos diagramas a mano alzada. Se precisaron detalles sobresalientes como la presencia de minerales macro, oxidación, alteración, olor, la presencia de restos de animales, de tallos, semillas, carbón vegetal, fibras, etc. Luego, se procedió a seccionarlo al centímetro y al hacerlo se observaron otros detalles que permitieron completar las descripciones. Cada submuestra de un centímetro fue guardada en una bolsa sello pack previamente marcada, y sendas muestras de 50

unidades de 1 cm, fueron a su vez empacadas en una bolsa más grande, rotulada debidamente así: de 1 a 50, de 51 a 100, y a sí sucesivamente, hasta completar todo el núcleo de 950 cm. Estas muestras fueron preservadas y almacenadas para su posterior tratamiento en frío a menos de 6°C (Flórez *et al.*, 2023). De estas 950 muestras se extrajeron dos muestras para datación radiométrica por AMS 14C, localizadas entre 623-636 cm en los paleosuelos gemelos y, entre 870-882 cm de profundidad del N14.

Preparación de muestras para el Análisis por Fluorescencia de Rayos X (XRF). La preparación de las muestras comprendió tomar una submuestra (aproximadamente 1/4 del total). Cada una de ellas se lavó con agua desionizada Tipo I, y se tamizó en un

juego de mallas -140 y +230  $\mu\text{m}$  (105 y 63 micras, respectivamente), más el fondo. De este lavado, se tomó la fracción -230+fondo o sea la fracción más activa químicamente (limos, arcillas y iones libres en solución acuosa), se guardó en un envase de vidrio de 15 ml, con tapa, para su lectura en el equipo Épsilon1, Analizador XRF, del Grupo CIDEMAT, UdeA. En el momento de análisis por XRF, inicialmente se realizó una curva de calibración del equipo, para lo cual se leyó por cinco veces una misma muestra, con el objeto de verificar un resultado confiable, esta misma calibración se realizó cada 100 muestras, manteniendo la confiabilidad de las lecturas. Para cada lectura se tomó una alícuota de 1  $\text{cm}^3$  de la fracción activa para cada submuestra y, una a una, se colocó en un dedal o porta muestra propio del equipo, luego se posicionó en el lector del Equipo Épsilon1, se cerró la tapa y se inició su lectura. Cada muestra tomó 25 minutos, al cabo de los cuales, el equipo arrojó una lectura con la geoquímica elemental, la cual se compilo en un archivo propio del programa, la que fue luego transcrita a una matriz en Excel para su análisis posterior. En todos los casos se guardó los resultados del análisis elemental para cada muestra de sedimentos, en total se obtuvieron 950 registros de sedimentos y 20 de saprolitos de las rocas sedimentarias y algunos sedimentos actuales (Flórez *et al.*, 2023).

Con el Equipo Épsilon 1, se pudo determinar los siguientes elementos en porcentajes: Aluminio (Al), Silicio (Si), Fósforo (P), Azufre (S), Cloro (Cl), Potasio (K), Calcio (Ca) Titanio (Ti), Vanadio (V), Cromo (Cr), Manganeseo (Mn), Hierro (Fe), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Galio (Ga), Arsénico (As), Bromo (Br), Rubidio (Rb), Estroncio (Sr), Ytrio (Y), Zirconio (Zr), Plomo (Pb), Teluro (Te), Talio (Ta), Boro (B), Oro (Au), Platino (Pt), Renio (Re), Sodio (Na), Estaño (Sn), Euterio (Eu), Yterbio (Yb), Iridio (Ir), Lutecio (Lu), Samario (Sm) y Osmio (Os). No todos estuvieron presentes en todas las muestras.

Perdidas de peso por Ignición (*Loss on Ignition*) LOI (%).

La determinación del LOI, en los sedimentos del N14, incluyó su secado a 105°C por 24 horas, luego se su combustión en mufla durante 2 horas a una temperatura de 550°C, y con los respectivos cálculos se obtuvo una matriz de datos que fueron graficados para su interpretación posterior.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Cronoestratigrafía de Bramadora

A los sedimentos de este pantano se les pudo asignar tiempo en edad calendario (AC) dada la alta tasa de sedimentación continua, a valores extremos en las señales geoquímicas y a la existencia de tefras, con fechas históricas de ocurrencia bien conocidas, que han actuado como marcadores precisos de tiempo.

Fecha de radiocarbono:

- Restrepo (2004):

Entre 285-300 cm: edad reportada: 280±50 BP.

Entre 334-342 cm: edad reportada: 390±40 BP.

Entre 361-392 cm: edad reportada: 330±70 BP.

- En esta investigación en el N14:

Entre 623-636 cm: edad reportada: 360±30 BP.

Entre 870-882 cm: edad reportada: 700±30 BP.

Los dos núcleos datados solo están separados alrededor de 5 m, y la correlación de sus sedimentos es sencilla, estos fechamientos se han usado en su conjunto para deducir las tasas de sedimentación en el pantano.

- Flórez *et al.* (2023) indica que las tasas de sedimentación para el Pantano La Bramadora son:

Entre 1-144 cm: 0,81 cm/año, que corresponde a 177 años, equivalente en años calendario, entre 2022 y 1846.

Entre 144-189 cm: 0,7 cm/año, que corresponde a 30 años, equivalente en años calendario entre 1845 y 1815.

Entre 189-450 cm: 1.01 cm/año, que corresponde a 360 años, equivalente en años calendario entre 1815 y 1455.

Entre 450-623 cm: 1 cm/año, que corresponde a 173 años, equivalente en años calendario, entre 1515 y 1342.

Entre 623-870 cm: 1 cm/año, que corresponde a 247 años, equivalente en años calendario entre 1342 y 1095.

Entre 870-915 cm: 1 cm/año, que corresponde a 80 años, equivalente en años calendario entre 1095 y 1015. transición terrestre a pantano.

De 915-950 cm, hay un suelo terrestre con cristales de anhidrita pedogenética, sin datación.

La presencia de tefras en los sedimentos fue inicialmente sugerida por cambios sutiles de coloración y de texturas limosas durante la descripción muestra a muestra en el laboratorio y posteriormente por la presencia de valores extremos en algunos elementos geoquímicos, respecto a la serie completa de 950 valores o al menos respecto a las medias locales, especialmente de Al, Si, P, S, K, Ca, Ti y Fe. Con el fin de confirmar o eliminar la presencia de tefras, se tomaron muestras de estos niveles anómalos, a los cuales se les elimino la materia orgánica mediante agua oxigenada, y se examinaron al microscopio petrográfico.

Mediante consultas de fuentes sobre volcanismo histórico (Espinosa, 2001; Cepeda, 2020) fue posible asignar estas tefras a erupciones particularmente intensas (VEI 4 o superior). Los aerosoles volcánicos producidos por la erupción del Tambora durante la Erupción de 1815 se detectan a la profundidad de 189 cm. (Flórez *et al.*, 2023). De particular interés es el segmento entre 368 y 378 cm de profundidad donde se detectan microfrazas

correspondientes a la gran erupción del nevado del Ruiz de 1595 y del Huaynaputina de 1600. Dos niveles con tefras ubicados en 436 y 439cm., se corresponden con fuertes erupciones cerca de 1524 y 1527, cuya fuente es aún desconocida. Otros niveles de tefras, existen dentro del núcleo, pero ellos serán analizados al momento de estudiar los componentes

#### 4.2 Sensores paleoclimáticos preservados en los sedimentos del N14 del Pantano La Bramadora

Los sedimentos del N14, se describen con base en las figuras 2 y 3. La Figura 2 son las imágenes de cada serie de 50 cm de sedimentos recuperados con la Sonda Rusa (19 en total). Comenzando de techo a base, se pueden ver algunas de las características del N14, entre ellas los paleosuelos y los estratos arcillosos bandeados y/o laminados. La Figura 3 son los diagramas de la lito, pedo, tefro, quimio estratigrafía y del LOI. Inicialmente, se hace una descripción general de los sensores paleoclimáticos como son la lito estratigráfica, las capa de criptotefras, las capas con líticos volcánicos, la pedo estratigrafía y la quimio estratigrafía, luego, quizás con mayor detalle se describe cada serie de 50 cm, y se indica el comportamiento del LOI (%), el ambiente imperante durante la deposición de sedimentos, algunas características particulares, las tasas de sedimentación y el reporte de las datación radiométrica por AMS14C, tanto las tres reportadas por Restrepo (2004) como las dos realizadas en esta investigación.

En ambas figuras se puede observar la dominancia de las arcillas, en algunos casos con limos y más raramente arenas que están dispuestas a través de todo el núcleo de sedimentos y que marcan claramente los estratos minerales. Las arcillas son, por lo general, plásticas, ligeramente pegajosas, secas y ligeramente duras, bandeadas y/o laminadas y laminadas, con bandas y/o láminas de entre 0.5-5 cm y láminas menores de 0.5 mm; el color varía entre “arcillas gris verdosas” con colores entre 2.5Y5/1 gris y G/5G6/1 gris verdoso, “arcillas chocolate” con tonos entre 2.5Y5/1 gris y 2.5Y4/1 gris oscuro, y “arcillas gris azulosas” con colores entre G/5G6/1 gris verdoso y G7/5G.2 gris. Estas arcillas alternan en espesor y en color, pero un tipo de ellas suele dominar un gran sector del núcleo por ejemplo las verde-azulosas o arcillas de color chocolate con participación menor de las otras. En algunos casos las arcillas chocolate se desmoronan, mientras que las verdosas o azulosas llegan ser mucho más competentes. Las arcillas chocolate internamente y en algunos niveles de profundidad poseen raíces finas y oxidadas y muestran rasgos de

pedogénesis incipiente, mientras las verdosas, poseen fibras transparentes, y las azulosas son totalmente limpias y son más masivas que las dos anteriores. Aunque el bandeamiento y/o laminación que presentan las arcillas definen una “ciclicidad sedimentológica”, susceptible de estudio a resoluciones subanuales, este aspecto no será abordado en esta investigación porque la segmentación del núcleo no tuvo en cuenta este factor. Las arcillas están interrumpidas por la presencia de capas de criptotefras, capas de líticos volcánicos y/o de paleosuelos. Las diferencias en el color de las arcillas se corresponden con comportamientos geoquímicos o pedológico y especialmente con el tipo de ambiente dominante; a modo de ejemplo un ambiente de pantano de hierbas, bajo un clima cálido, con exceso de agua proporcionada por precipitaciones torrenciales y una fuerte escorrentía, se expresa como arcillas chocolate, en especial, podrían ser las que mejor expresen los periodos con el nivel freático a ras con el suelo o con una pequeña lámina de agua sobre ellos, lo que corresponde a años con exceso de agua.

Limos y arenas, tienen poca expresión en todo el núcleo, los limos están más asociados a la presencia de paleosuelos limosos y las arenas tanto a paleosuelos arenosos como a las capas de criptotefras o de líticos, estas últimas alternan tanto con las arcillas como con los paleosuelos, por lo común, unas y otras son de 1 a 3 cm de espesor, contienen vidrio volcánico, fragmentos de matriz y minerales tales como orto piroxeno, hornblendas pardas, augitas y sanidina, especialmente. Las líticas son arenosas y presentan además de minerales, fragmentos líticos del basamento rocoso de la cuenca.

Los paleosuelos, están presentes en todo el núcleo, pero son más notables en el techo (170 cm de paleosuelos, mediados por pequeñas capas de arcilla y una de criptotefra), en la base (156 cm de paleosuelos, mediados por dos capas de criptotefras) y los dos “mellizos” cerca de 630cm. Los paleosuelos del techo indican una condición ambiental de clima cálido seco en donde se desarrolló un pantano arbóreo y en menor área un pantano de hierbas, con déficit de agua en el humedal. Por su parte el aridisol de la base marca el clima más seco registrado en el núcleo, lo que permitió el desarrollo de un bosque seco tropical, con un déficit de humedad extremo, como lo atestigua la presencia de anhidrita pedogénica. Por su parte, los ambientes con lámina de agua permanente solo permitieron el desarrollo incipiente de paleosuelos de muy pequeño espesor.



**Figura 2.** N14 de sedimentos de 9.50 m recuperado en el Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, (Figura 2a superior, Figura 2b, inferior). Léase: De izquierda a derecha en metros comenzando con la imagen superior: (0-0.5, 0.5-1.0, 1.0-1.5, 1.5-2.0, 2.0-2.5, 2.5-3.0, 3.0-3.5, 3.5-4.0, 4.0-4.5, 4.5-5.0, 5.0-5.5, 5.5-6.0, 6.0-6.5, 6.5-7.0, 7.0-7.5, 7.5-8.0, 8.0-8.5, 8.5-9.0, 9.0-9.5). 19 secciones de 50 cm, cada una, recuperadas con la Sonda Rusa.

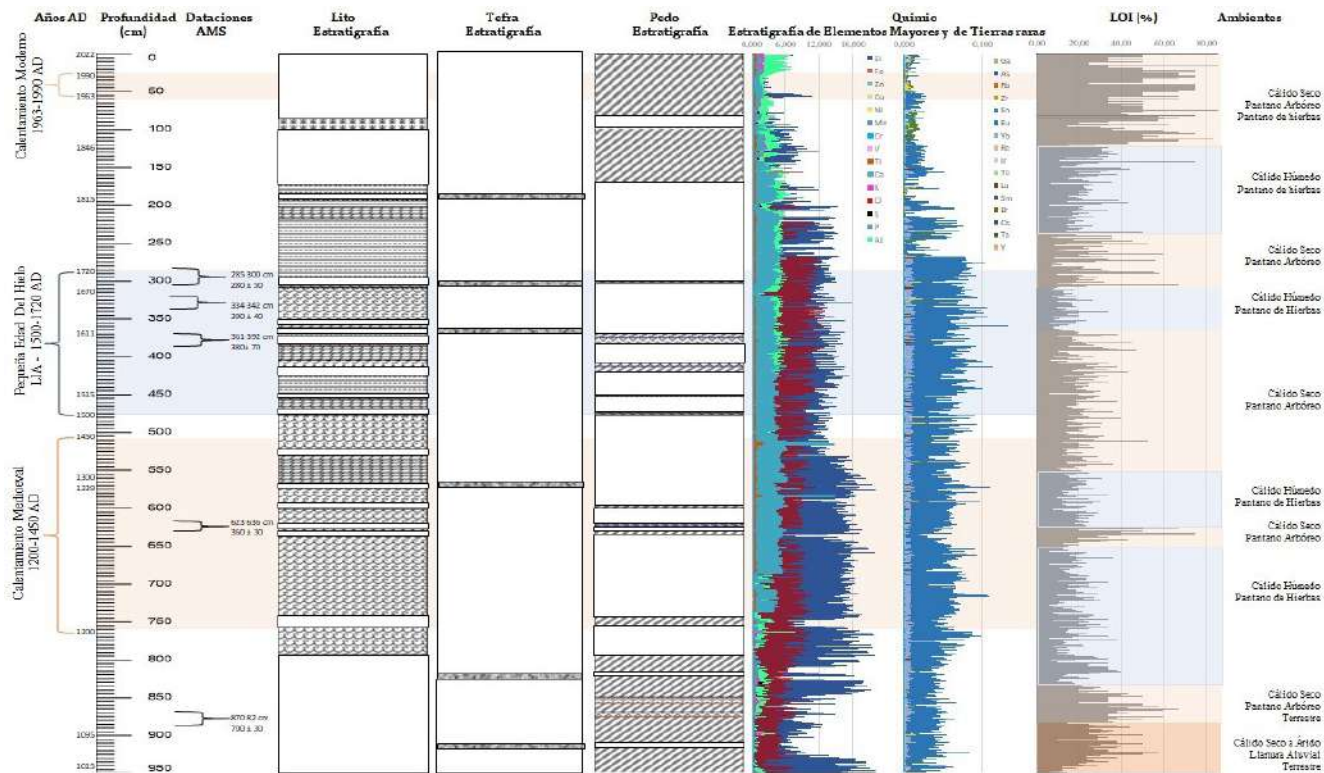
La quimio estratigrafía -composición elemental porcentual obtenida por RXF- permitió, en muchos casos, marcar el límite entre estratos minerales, capas de cripto tefras o de líticos y paleosuelos, además insinúa sobre la razón del cambio geoquímico que presentan las bandas y/o láminas y/o laminaciones en las arcillas, así como la presencia de los paleosuelos, que, en este caso, los valores en la concentración elemental disminuyen ostensiblemente coincidiendo con aumentos en el porcentaje de la materia orgánica (LOI). La composición geoquímica también define “cierta ciclicidad” tanto en la sedimentación de los estratos minerales como los paleosuelos.

La Figura 3 es una composición gráfica que muestra, de izquierda a derecha: 1) el tiempo en AD; 2) las dataciones realizadas por radiocarbono que permitieron hacer la cronología en años calendario y determinar las tasas de sedimentación; 3) la litoestratigrafía, las criptotefras y capas líticas, la pedo estratigrafía y la quimio estratigrafía en todo el núcleo, en este aspecto, se debió extraer de la gráfica, no del análisis, algunos elementos como el Na, el B y el Au, que están en ciertas profundidades como valores extremadamente altos y no dejan visualizar moderadamente los demás elementos leídos que si tienen concentraciones, más o

menos regulares, y 4) de manera integrada la curva del LOI (%) y se resalta la relación que esta muestra con respecto a la cantidad de agua retenida anualmente en el humedal; las franjas azules indican retenciones altas y las amarillo-naranja los periodos con déficit. Se indican además los sitios donde se efectuaron dos dataciones (14C AMS) para este estudio y las de Restrepo (2004), estas tomadas en un núcleo paralelo de 4 m, localizado a 20 m del N14.

### 4.3 Sensores lito – pedo - quimio estratigráficos y el LOI (%)

Descripción del Núcleo 14 (N14) (ver una descripción más detallada en el Anexo 1). Se inicial las descripciones de techo a base, entre 0 y 950 cm, con la caracterización del material desde el punto de vista pedológico, litológico y geoquímico. Dado que, en el núcleo, los materiales se intercalan variando en sus características y espesores, se hace la interpretación ambiental deducida de dichas características, logrando así, ubicarlas cronológicamente y relacionarlas con eventos locales o globales, tales como volcanismo y/o eventos Niño y Niña, esencialmente.



**Figura 3.** De izquierda a derecha se relacionan el tiempo en años AC, las dataciones, la lito, criptotefra, pedo, y quimio estratigrafía y el porcentaje de materia orgánica (LOI), entendidos como sensores paleoclimáticos y reconstructores de ambientes en los sedimentos del N14, recuperados en el Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia. En la figura también se muestra, al menos, en el último milenio, el reflejo del Calentamiento Moderno entre 26-54 cm (1990-1963 AC), evidencias de la Pequeña edad de hielo (LIA), entre 284-461 cm (1500-1720 AC), y el reflejo del Calentamiento medioeval, entre 511-715 cm (1200-1450 AC). Las barras horizontales azul y rosa indican el clima frío y cálido, respectivamente. En cada una de las columnas verticales se muestra, de izquierda a derecha los diversos tipos de arcillas, las profundidades donde se encontraron materiales volcánicos, y la ubicación del suelo actual y de los paleosuelos.



En el techo se encuentra un suelo actual de 18 cm de espesor, varía en el color y textura así: de 0-7 cm, horizonte Ah, de color 7.5Y4/2, pardo y la textura limosa (L); de 8-11 cm, horizonte Btg de color 2.5Y3/2, pardo grisáceo, la textura es arcillosa (Ar), presencia de arcilla iluvial, y entre 12-18 cm, un horizonte BCg del color es 5Y7/2 gris claro y textura arcillosa (Ar). La estructura tiende a bloques finos, débiles (Bfd) en los dos primeros horizontes, en el tercero no tiene. Presenta abundantes las fibras orgánicas, de espesor medio (2 a 5 mm) y en la base laminación muy fina de 4 mm, muy marcada por un cambio en el color de las láminas, y entre ellas se alinean minúsculos trozos de carbón (1 o 2 mm). Este suelo fue clasificado como un *Typic Endoaqualfs* (Soil Survey Staff, 2014).

Subyaciendo este suelo un paleosuelo de 59 cm, con abundante materia orgánica (MO), aún reconocible, especialmente, fibras gruesas, medias y finas; hojas, tallos, raíces, semillas de tamaños variables, algunas de las cuales, en avanzado estado de descomposición, otras muy oxidadas. De estructura migajosa, arcillo arenosa (ArA), y color 2.5Y3/2 pardo grisáceo muy oscuro. La composición geoquímica elemental, consta, básicamente, por orden de magnitud promedia de Si, Fe, Al, Cu, Ni, Zn, Sn, Ti, Pb, K, Zr, Ca, Mn, S, P, Mg, Cl, Rb, Yb, Eu, Ga, Sr, Ir, Re y Au. El Si, con valores ligeramente altos en el techo y en la base. Se reporta, además, Au, Ta y B. La curva del LOI (%), corrobora la presencia del suelo y del paleosuelo, su valor promedio es de 52%.

Entre 77-79 cm, se observa una capa arenosa de 2 cm de espesor con líticos volcánicos (posiblemente basaltos Cretáceos). En 78 cm todas las concentraciones elementales aumentan coincidiendo con la criptotefra. A los 100 cm el Fe decae notoriamente (1,927%). Se reporta Au en 63, 67, 70 y 80 cm (en todos los casos 0,1%).

Entre 79-170 cm, otro paleosuelo que alterna en color desde un 2.5Y3/3 pardo oliva oscuro, G6/10Y, gris verdoso y un 2.5Y4/1 gris oscuro; la textura es ArA. Estructura en bloques subangulares (Bsa), finos, fuertes, MO altamente descompuesta en ambos horizontes y muchas fibras delgadas y oxidadas; en la parte media hay fragmentos de carbón de entre 2 y 5 mm. La composición geoquímica elemental, consta, básicamente, por orden de magnitud promedia de Si, Al, Fe, K, S, Sm, Ca, Ni, Sn, Cu, Zr, Mg, Cr, Zn, P, Na, Ti, V, Mn, Yb, Cl, Pb, Rb, Eu, Ga, Te, As, Re, Sr, Ir, y Au. En todo el segmento los componentes proporcionan diversos patrones de distribución y ello permite visualizar cierta ciclicidad geoquímica, la cual, está dispuesta así: entre 101-104 cm y 105-107 cm, se registran dos ciclos geoquímicos con valores bajos, luego, otro ciclo con una distribución cuasi normal, entre 108-112 cm. Entre 113-117 cm, y entre 118-120 cm, tres ciclos geoquímicos donde los porcentajes bajan. Luego,

entre 121-127cm y 128-132 cm, de nuevo con una distribución cuasi normal, otros dos ciclos geoquímicos. Finalmente, entre 133-140 cm tres picos casi iguales insinúan una distribución lineal mientras que entre 141-145 cm y 146-150 cm.

La curva del LOI, presenta valores relativamente bajos, sin embargo, en 113 cm se registra el más alto (83,33%) y en 149 el más bajo (10,53%). Los altos valores en la curva del S, registrados en toda la secuencia de paleosuelos, estaría implicando la presencia de un azufre pedogenético, el más alto. Los valores de S más altos se observaron en 122 y 123 cm (1,781%, 2,099%, respectivamente, y los más bajos en los últimos 5 cm de todo el segmento 146-150 cm (<0,03%), lo cual coincide con el estrato mineral arcilloso. El promedio del LOI en todo el segmento es de 36%.

Desde la superficie hasta 144 cm, se registra bien el inicio del clima contrastado y estacionalmente deficitario en agua que impera hoy día en el Pantano, marcado por fuerte acumulación de materia orgánica, valores altos de Azufre (S) y desarrollo de suelo. Predominan las condiciones de un clima es cálido seco, ambiente es pantano arbóreo con déficit de agua atmosférica y hacia la base Pantano de hierbas bajo un clima cálido húmedo (entre 145-150 cm).

Entre 170-188 cm, hay un estrato mineral arcilloso, conformado por arcillas secas y ligeramente duras, bandeadas y/o laminadas, con bandas y/o láminas entre 2 mm y 5 cm, que se alternan entre “arcillas gris verdosas” con colores entre 2.5Y5/1 gris y G/5G6/1 gris verdoso, “arcillas chocolate” con tonos entre 2.5Y5/1 gris y 2.5Y4/1 gris oscuro, y “arcillas gris azulosas” con colores entre G/5G6/1 gris verdoso y G7/5G.2 gris pálido, que contienen fibras delgadas transparentes. Tasa de sedimentación de 0.81 cm/año (entre 1-144 cm, 177 años), equivalente entre 2022 y 1845 AC.

Entre 188-189 cm, se encuentra una criptotefra.

Entre 189-368 cm, nuevamente un estrato de arcillas bandeadas y/o laminadas y laminadas de diversos colores que se alternan entre verdosas, azulosas y chocolate: “arcillas chocolate” con tonos 2.5Y5/1 gris y 2.5Y4/1 gris oscuro y “arcillas gris verdosas” con colores 2.5Y5/1 gris y G/5G6/1 gris verdoso. Las bandas y/o láminas varían entre 2 mm y 5 cm de espesor. Internamente, presenta algunas variaciones en color y espesor de las bandas y/o láminas. Estas arcillas son plásticas y ligeramente pegajosas, ligeramente consistentes, algo húmedas. En los sitios donde aparecen bandas y/o láminas chocolate presentan deformación interna, pero no tan fuerte como en el segmento anterior, en el cual, las bandas y/o láminas son de más espesor.

La composición geoquímica elemental, consta, básicamente, por orden de magnitud promedia de Si, Fe, Ca, Al, Mg, Sn, Eu, K, Ti, S, Zr, Cl, Pb, V, Ni, Sr, Cu, Mn, Yb, Cr, Rb, Ga,

P, Y, Zn, Re, Lu, Ir, Os, Au. En 266 cm, la composición cambia completamente, las concentraciones de Si, Fe, Al, P, S, Ca, Ti y Mn bajan ostensiblemente, solo el Cl sube un poco, otros elementos como Mg, V, Cr, Ni, Cu, entre otros, no son reportados. El conjunto de datos geoquímicos para esta serie muestra tres tendencias: 1) entre 250-262 cm, donde se puede observar el predominio del Si sobre los demás elementos y la tendencia de todos en ese rango es negativa; 2) entre 262-266 cm, marcada por el dominio del Si, que al igual que los demás elementos su comportamiento es dual, sube-baja-sube en un tramo y luego toma una tendencia positiva, y 3) entre 267-300 cm, en este último rango, se observa una mayor uniformidad composicional y está directamente relacionada con el bandeamiento físico del estrato, los valores más altos los dibujan el Si y el Fe, seguidos por el Ca, esto indica bien el estrato mineral laminado, al menos, al “centímetro”. Sin embargo, en toda la serie, se visualiza esta laminación que es constante pero diferenciada en color y espesor de las láminas. Entre 300 y 350 cm los datos geoquímicos para esta serie muestran una variación composicional cíclica, tanto para los cuatro elementos (Si, Fe, Ca y Al) que tienen los valores más altos como para el resto de los elementos, con valores más bajos, pero igual de contundentes. Esta ciclicidad está reflejando la relación entre la composición geoquímica de los materiales geológicos con el bandeamiento físico del estrato. Los valores más altos los dibujan el Si y Fe, seguidos por Ca y Al, que marcan bien el estrato mineral laminado, al menos, al “centímetro”. El espesor y color variado y alternado que tienen las bandas y/o láminas es el reflejo de esta variación geoquímica y cíclica versus tiempo (cm/año).

La curva del LOI, se acopla a las características del material mineral, en el caso de las arcillas grises o gris oscuras, los valores del LOI son más altos que los de las arcillas gris verdosas. El LOI tiene una media de 16%.

Todo el estrato se formó bajo un clima cálido húmedo, bajo ambiente pantano de hierbas. Restrepo (2004) realizó una datación entre 334 y 342 cm, que arrojó una edad equivalente a 1662 y 1670 AC.

Entre 368-369 cm, se presenta una capa de criptotefra.

Entre 369-377 cm, hay un paleosuelo, fibroso, de 3 cm, sin estructura, son de color 2.5Y4/2, pardo grisáceo oscuro. El primero, de 3 cm, presenta abundantes fibras muy finas, de hasta 5 cm de largo, muy oxidadas, así restos orgánicos reconocibles y tallos de hasta más de 3 cm, todo este material orgánico está extremadamente oxidado y llega a constituir un 80% de todo el espesor. Rasgos pedogenéticos incipientes, MO muy evolucionada y esta le imprime a la serie una irregularidad muy similar a lo que pasa con las arcillas chocolate.

Entre 377-378 cm, presenta una capa de criptotefra.

Entre 378-381 cm, paleosuelo de 3 cm, sin estructura, de color 2.5Y4/2, pardo grisáceo oscuro. Presenta abundantes fibras muy finas, de hasta 5 cm de largo, muy oxidadas, así como restos orgánicos reconocibles y tallos de hasta más de 3 cm, todo este material orgánico está extremadamente oxidado y llega a constituir un 80% de todo el espesor. Rasgos pedogenéticos incipientes, MO muy evolucionada y esta le imprime a la serie una irregularidad muy similar a lo que pasa con las arcillas chocolate.

Entre 381-400 cm, hay arcillas bandeadas y/o laminadas plásticas, ligeramente pegajosas, ligeramente secas y brillantes que alternan en color y espesor entre 2.5Y5/1 gris y G/5G6/1 gris verdoso, que predomina sobre las de color 2.5Y5/1 gris y 2.5Y4/1 gris oscuro, y G/5G6/1 gris verdoso y G7/5G.2 gris pálido. El espesor de estas bandas y/o láminas varían entre 0.5 a 3 cm. Entre 395 y 400 cm, bandas y/o láminas están ligeramente inclinadas casi 15°. Como en los estratos arcillosos que le anteceden, las arcillas chocolate también presentan irregularidades.

La composición geoquímica elemental, consta, básicamente, por orden de magnitud promedia de Na, Si, Au, Fe, Ca, Al, Mg, K, Ti, Eu, Zr, Sn, S, Lu, Cl, Ni, V, Pb, Zn, Rb, Y, Sr, Yb, Cu, Ga, Mn, P, Cr, Ir, Re, Os. De esta composición elemental se destaca la presencia de Na y el Au que en concentración porcentual acompañan al Si, Fe, Ca y Al, con valores altos en varios sitios de serie, siendo los más importantes los reportados en 368 y 378 cm, ya que, en estos puntos, a diferencia de las demás series, también aumentan su concentración otros elementos en ambos casos. Si, Fe, Ca y Al, son los elementos marcadores de la ciclicidad geoquímica que se presenta en todo el estrato, la cual, podría estar relacionada con las láminas, a su color y espesor.

La curva del LOI, en esta serie, también se acopla a las características del material mineral, en el caso de las arcillas grises o gris oscuras, los valores del LOI son más altos que los de las arcillas gris verdosas. El LOI tiene una media de 17%.

El clima es contrastante entre un cálido húmedo-cálido seco-cálido húmedo, predominando un ambiente de pantano de hierbas. Restrepo (2004) realizó una datación entre 361-392 cm, que arrojó una edad equivalente a 1579 y 1611 AC.

Entre 400 y 403 cm, un paleosuelo de color 2.5Y4/1 gris oscuro, sin estructura, de textura Ar, con escasas evidencias de pedogénesis, algunas fibras finas y muy oxidadas.

Entre 403-412 cm, un estrato mineral de arcillas bandeadas y/o laminadas que alternan en color y espesor de las bandas y/o láminas entre arcillas verdosas y azulosas; las de color gris verdoso varían entre un 2.5Y5/1 gris y G/5G6/1 gris verdoso. Las gris azulosas varían entre G/5G6/1 gris verdoso y G7/5G.2 gris pálido. El espesor de las bandas y/o láminas también es variable, desde 1 o 2 mm hasta 2 cm, estos dos aspectos se observan en todo el segmento. Estas bandas y/o láminas se intercalan entre sí;

las arcillas chocolate que presentan fibras muy finas y oxidadas. Las arcillas son plásticas, pegajosas y están ligeramente húmedas, hecho que hace que se desconformen. Las zonas más oscuras presentan apariencia irregular, superficialmente se forman irregularidades que dan un relieve negativo

Entre 412-423 cm, un paleosuelo, de textura Ar, con evidencias de pedogénesis, hay fibras oxidadas y una pseudo estructura migajosa débil, textura Ar, presencia de MO muy oxidada y valores altos en Si y B, en 417 cm y boro.

Entre 423-600 cm, otra serie de arcillas bandeadas y/o laminadas gris verdosas y gris azulosas que se alternan entre sí, como las descritas en la parte inicial del segmento, pero se diferencia de las anteriores es que no tienen fibras.

La composición geoquímica elemental, consta, básicamente, por orden de magnitud promedia de B, Si, Fe, Au, Ca, Al, Mg, K, Ti, Eu, Zr, Sn, S, Cl, Sr, V, Mn, Rb, Ni, Yb, Y, Zn, Ga, Pb, Cu, P, Cr, Ir, Te, Re, Os. De esta composición elemental se destaca la presencia de B y el Au que en concentración porcentual acompañan al Si, Fe, Ca y Al con valores altos en varios sitios de serie, siendo los más importantes los reportados en 436 y 439 cm, ya que, en estos puntos, a diferencia de los demás de la serie, también aumentan su concentración otros elementos en ambos casos.

La curva del LOI, en esta serie, también se acopla a las características del material mineral, en el caso de las arcillas con colores oscuros el LOI es más alto que los de las arcillas más claras. El LOI tiene una media de 21%.

El clima es contrastante entre un cálido húmedo-cálido seco-cálido húmedo, predominando un ambiente de pantano de hierbas en las arcillas y en los paleosuelos pantano arbóreo.

La tasa de sedimentación calculada para el segmento entre 189 y 450 cm fue de 1.01 cm/año. Aproximadamente, 360 años, equivalente a 1815 y 1455 AC.

Entre 573-574 cm, se localiza una criptotefra.

Entre 574-597 cm, predominan arcillas “arcillas chocolate” sobre las “arcillas gris azulosas”. En ambos casos son bandeadas y/o laminadas; las bandas y/o láminas presentan espesores mayores a las del tramo anterior, este varía 2 mm hasta 5 cm. Son plásticas, ligeramente húmedas y pegajosas; consistentes, excepto en el caso de las bandas y/o láminas oscuras, las cuales se desconforman un poco formando grietas verticales y alguno que otra oquedad.

La composición geoquímica elemental, consta, básicamente, por orden de magnitud promedia de Si, Fe, Al, Ca, Mg, K, Te, Sn, Yb, Ti, Eu, S, Zr, Ni, Cl, Sr, V, Mn, Zn, Rb, Pb, Y, Cr, Cu, Ga, P, Ir, Re, Os, Lu. De esta composición elemental se destaca la presencia de Si, Fe, Al y Mg con valores altos en varios sitios de la serie, siendo los más importantes los reportados para

Fe, Si, Al, Mg, en algunos de estos puntos también aumenta la concentración de otros elementos o disminuye, y puede o no estar. Si, Fe, Al y Mg, son los elementos marcadores de la ciclicidad geoquímica que se presenta en todo el estrato.

La curva del LOI, en esta serie, también se acopla a las características del material mineral, en el caso de las arcillas con colores oscuros el LOI es más alto que los de las arcillas más claras, el valor promedio es de 18%.

El clima es contrastado cálido húmedo para las arcillas con un ambiente de pantano de hierbas y un clima cálido seco para el paleosuelo, con un ambiente de pantano arbóreo.

Entre 597-627 cm, un paleosuelo de color 2.5YR3/2, rojo oscuro, textura ArA, estructura en Bsa, finos, moderados. MO aún reconocible, principalmente tallos y raíces.

Entre 627-630 cm, un estrato arcilloso de 3 cm de espesor, el color es Gley 2G/5B, gris azulosa. Estas arcillas contienen fibras y pedacitos de tallos y de carbón, no tienen evidencia de pedogénesis, pero sin MO reconocible.

Entre 630-636 cm, un paleosuelo de color 2.5YR2.5/2, rojo muy oscuro, textura ArA, estructura en Bsa, finos, moderados. MO aún reconocible, principalmente hojas y tallos.

Entre 636-744 cm, un estrato mineral de arcillas bandeadas y/o laminadas que se alternan en color desde un 2.5Y5/1 gris y G/5G6/1 gris verdoso, y Gley2G/5B, gris azulosa. El espesor de las bandas y/o láminas también es variable, en el techo es milimétrico, pero aumenta hacia la base desde 0.5 a 2 cm. Estas arcillas plásticas y son más secas que las del techo.

Dada la lito y pedo estratigrafía, reconocida en todo el segmento se sacó la composición elemental promedia de Si, Fe, Al, Ca, Mg, K, Te, Sn, Yb, Ti, Eu, S, Zr, Ni, Cl, Sr, V, Mn, Zn, Rb, Pb, Y, Cr, Cu, Ga, P, Ir, Re, Os, Lu. Las concentraciones son muy variables, este comportamiento podría corresponder a una “ciclicidad geoquímica” y estar relacionada con las bandas y/o láminas, a su color y espesor. Si, Fe, Al y Ca, son los elementos marcadores de esta, los valores altos o bajos, entendidos como puntos de inflexión, precisan dichos cambios que son acentuados por el LOI cuyo valor promedio fue de 33%.

La tasa de sedimentación de 1.0 cm/año entre 450-623 cm. Aproximadamente, 173 años, equivalente entre 1338 y 1224 AC. En esta investigación se realizó una datación en el intervalo 623 y 636 cm, la cual equivale a una edad entre 1325 y 1338 AC. Estos paleosuelos “mellizos”, están justo en la mitad del intervalo del Calentamiento Medioeval (1200-1450 AC), lo cual, también coincide con dos eventos de sequía (entre 4 o 5 años cada uno), mediados por un clima ligeramente más húmedo, registrado en Colombia.

De 700-744 cm, el clima es cálido húmedo y ambiente de pantano de hierbas, arcillas laminadas cíclicas, entre 744-750 cm, el clima sería cálido seco y el ambiente de pantano arbóreo.

Entre 744-756 cm, un paleosuelo, de color 2.5YR2.5/2, rojo muy oscuro, textura ArA, estructura en Bsa, medios, débiles. MO aún reconocible pero muy oxidada, internamente se observan algunas fibras finas y trocitos de carbón de hasta 0.5 cm. El paleosuelo también se observa ligeramente inclinado y esta ligeramente seco. La composición geoquímica elemental, consta, básicamente, por orden de magnitud promedia de Si, Fe, Al, Ca, Mg, K, Sn, Yb, Eu, Zr, Ti, S, Cl, Ni, Rb, Sr, V, Mn, Cu, Pb, Ga, Zn, Y, P, Cr, Ir, Re, Os.

Entre 756-795 cm, se presenta un estrato de arcillas bandeadas y/o laminadas verdosas, azulosas y arcillas chocolate que se alternan entre sí. Las arcillas verdosas varían desde un Gley2 8/10BG gris verdusco claro a un G/10BG gris verdusco; las azulosas varían entre G/5G6/1 gris verdoso y G7/5G.2 gris pálido y las arcillas chocolate son de color 2.5Y5/1 gris. Las bandas y/o láminas tienen espesores entre 0.2 y 4 cm y son de menor espesor las bandas y/o láminas de arcillas chocolate. Dentro de este estrato se separaron tres secciones de arcillas chocolate que presentaron un mayor espesor (1 a 3 cm) y algunos rasgos pedogenéticos como fue la presencia de fibras oxidadas y una pseudo estructura incipiente, tienen grietas verticales y oquedades y son menos confinadas que las arcillas gris verduscas con las que alterna.

Entre 795-818 cm, un paleosuelo de color 2.5Y4/2, pardo grisáceo oscuro, textura Ar, estructura en Bsa, medio, moderado. MO aún reconocible, abundantes fibras oxidadas y trocitos de carbón de hasta 1 cm en el techo bien estructurado.

Entre 818-820 cm, se encuentra una criptotefra que tiene pedacitos de carbón estructurado de 0.5 cm.

Entre 820-850 cm, un paleosuelo presenta textura Ar, estructura en Bsa, medios, fuertes. MO aún reconocible, abundantes fibras oxidadas y trocitos de carbón de hasta 1 cm. En el techo tiene una fuerte oxidación la MO. Ligeramente seco. Internamente presenta variaciones en color, principalmente, que pueden estar referidas a horizontes o cambios internos a nivel mineralógico o geoquímico, estas se presentan así: 1) entre: 820-825 cm y 825-832 cm, para ambas el color es 2.5YR2.5/2 rojo muy oscuro, pero la primera tiene más trozos de carbón, abundante MO aún reconocible; 2) entre 832-834 cm, 834-839 cm, 839-840 cm, color 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro, abundante MO y algunos trozos de carbón, y 3) entre 841-850 cm, color 2.5YR2.5/2 rojo muy oscuro, con abundante MO aún reconocible, trozos de carbón en la base y ligeramente más seco.

La composición geoquímica elemental, consta, básicamente, por orden de magnitud promedia de Si, Fe, Al, Ca, Mg, K, Te, S, Sn, Yb, Eu, Ni, Sr, Cl, Mn, Cr, Zn, Rb, Ti, Cu, Ga, Pb, Y,

P, As, Re, Ir. Los cuatro primeros elementos son los marcadores de la ciclicidad geoquímica que se presenta en todo el estrato, además, son los que tienen las más altas concentraciones porcentuales. Entre 750-756 cm y 795-800 cm, que corresponden a los dos paleosuelos en techo y base, respectivamente, todas las concentraciones elementales disminuyeron con respecto a las reportadas para las arcillas, pero dicha disminución fue más fuerte en el paleosuelo del techo. En el primer y último cm de toda la serie, los valores del Si fueron extremadamente bajas.

La curva del LOI, en esta serie, también se acopla a las características del material mineral, en el caso de las arcillas con colores oscuros el LOI es más alto que los de las arcillas más claras, para el paleosuelo, localizados en el techo y en la base, marca muy bien la presencia de MO. El valor promedio del LOI fue 22%.

De 750-756 cm, el clima es cálido seco y el ambiente de pantano arbóreo muy evolucionado. De 756-794 cm el clima es cálido húmedo y el ambiente de pantano de hierbas. De 794-800 cm, el clima es cálido seco y el ambiente de pantano arbóreo muy evolucionado. De 800 a 850 cm, el clima es cálido seco y el ambiente de pantano arbóreo muy evolucionado.

Entre 850 y 900 cm, se presentan dos discordancias leves y dos paleosuelos. Los paleosuelos presentan un tenue bandeamiento y una ligera inclinación; sin embargo, poseen rasgos pedogenéticos claros como son: el color, el desarrollo de estructura, la presencia de MO aún reconocible y los trozos de carbón.

Entre 850-825 cm, se ubica la primera discordancia estratigráfica, morfológicamente, es un paleosuelo fuertemente agrietado tanto en sentido vertical como diagonal, formando superficies triangulares (no cuñas). El color es 2.5YR2.5/2 rojo muy oscuro, de textura Ar. Presenta MO altamente descompuesta y ligeramente oxidada, al igual que trozos de carbón de hasta 1 cm, ligeramente estirados y con fractura astillada como “destrozados”. Los límites superior e inferior son muy irregulares y abruptos.

Entre 858-870 cm, hay un paleosuelo de color 2.5Y4/2, pardo grisáceo oscuro, textura Ar, estructura en Bsa, medio, fuerte. MO aún reconocible, abundantes fibras oxidadas y trocitos de carbón de hasta 1 cm. Este paleosuelo parece contener dos horizontes, uno superior entre 858-867 cm, pardo grisáceo oscuro, con carbón cerca al techo; el inferior entre 867-870 cm, gris azulado, con trozos de carbón y MO, especialmente fibras.

Entre 870-876 cm, se presenta otra discordancia, similar a un paleosuelo fuertemente agrietado, con grietas verticales y muy largas, de color 2.5YR2.5/2 rojo muy oscuro, textura Ar. Abundante MO altamente oxidada, al igual que trozos de carbón de hasta 1 cm, estirados y con fractura astillada como “destrozados”. Los límites superior e inferior son muy irregulares y abruptos.

Entre 876-915 cm, un paleosuelo de color 2.5Y4/2, pardo grisáceo oscuro, textura Ar, estructura en Bsa, medio, fuerte. MO aún reconocible, abundantes fibras oxidadas y trocitos de carbón de hasta 1 cm. En 882 cm un tronco de madera de 1.2 cm muy bien conservado. Este paleosuelo, internamente, parece estar dividido en tres horizontes, uno entre 876-882 cm, tiene como límite superior la discordancia y como límite inferior una línea de carboncitos, en ella se observó un tronco de 1.2 cm; otro que le subyace, entre 882-890 cm, con un límite superior muy definido (descrito antes) y el inferior transicional, dentro de este se marcan algunos puntos que muestran un ligero cambio en el color; el tercero entre 890-900 cm, de color 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro, ligeramente más seco y con algunas grietas verticales hacia la base.

La composición geoquímica elemental, en general, consta, básicamente, de Si, Fe, Al, Ca, Mg, K, Te, S, Sn, Yb, Eu, Ni, Sr, Cl, Mn, Cr, Zn, Rb, Ti, Cu, Ga, Pb, Y, P, As, Re, Ir, Te, Lu, Y. Si, Fe, Al y Ca, son los elementos marcadores de la ciclicidad geoquímica que se presenta en toda la serie, además, son los que tienen las más altas concentraciones porcentuales de todos los referidos. Ellos permiten comprobar las delimitaciones estratigráficas. Del mismo modo lo hacen los valores del LOI, que complementan y precisan lo dicho, el valor promedio de este parámetro fue: para la discordancia del techo 29%, para el paleosuelo que la subyace 46%; para la segunda discordancia 42% y para el segundo paleosuelo en la base de la serie, 32%. En las dos discordancias su valor es ligeramente menor.

De 800-870 cm el clima es cálido seco y el ambiente de pantano arbóreo muy evolucionado. Tasa de sedimentación de 1.0 cm/año entre 623 y 870 cm. Aproximadamente, 247 años, equivalente en AC, entre 1282 y 1035. Entre 870-882 cm, se efectuó, en esta investigación la datación realizada permite dar una edad entre 1053 y 1095 AC.

Entre 915-916 cm, se encuentra una criptotefra que tiene fragmentos líticos de basaltos.

Entre 916 y 950 cm, hay un paleosuelo de textura Ar, estructura en Bsa, medios, fuertes. MO aún reconocible, abundantes fibras oxidadas y trocitos de carbón de hasta 1 cm. En el techo tiene una fuerte oxidación la MO. Ligeramente seco. Internamente presenta variaciones en color. En este paleosuelo se encuentra Anhidrita en abundancia, indicativa de ambiente árido y con base en la *Soil Survey Staff (2014)*, se clasificó como *Xeric argigypsis*. La composición geoquímica elemental, en general, consta, básicamente, de Si, Fe, Al, Ca, Mg, K, Te, S, Sn, Yb, Eu, Ni, Sr, Cl, Mn, Cr, Zn, Rb, Ti, Cu, Ga, Pb, Y, P, As, Re, Ir, Te, Lu, Y.

De 915-945 cm, clima cálido extremadamente seco, casi árido, ambiente de bosque terrestre; en los últimos 5 cm (945-950

cm), el clima cambia a un cálido húmedo, la presencia de arenas gruesas indica torrencialidad.

4.4 Perdidas de peso por Ignición (*Loss on Ignition*) LOI (%). Para su análisis se tuvo en cuenta las características de cada muestra, las de todo el estrato, capa o paleosuelo, el material de partida y las condiciones propias de la cuenca aportante de este material al pantano. El valor promedio del LOI, es difícil establecerlo debido a los diversos ambientes que muestran cierta ciclicidad climática en rangos de tiempo variables, pero lo que, si se logra resaltar que en el techo están los valores más altos, en la base, ligeramente altos y fluctuantes en el centro, donde hay paleosuelos el valor es más alto. Con base en los porcentajes obtenidos se interpretó el contenido del LOI en los sedimentos del N14, Figura 4, de la siguiente forma:

- Valores elevados del LOI (%), en el sedimento del pantano podrían corresponder a climas CÁLIDOS-SECOS, que permitieron el desarrollo de un PANTANO ARBOREO, con déficit de agua en la cuenca, disminución en la precipitación, incorporación de MO, menor erosión hídrica, mayor contenido arbóreo (expansión del bosque), desarrollo de árboles híbridos (terrestres y anfibios). Bajo esta condición se da el desarrollo del suelo (paleosuelos), con abundante MO en diferentes estados de descomposición. Tanto en el techo como en la base, paleosuelos de gran espesor, en el techo mediados por la presencia de herbazales, y en la base, típico de un bosque terrestre. Los valores más altos del LOI se presentaron en los siguientes rangos: 15-118, 142, 238-306, 371-389, 510-515, 623-633, 844-925 cm.

- Valores bajos del LOI (%), en el sedimento del pantano podrían corresponder a climas CÁLIDOS-HUMEDOS, que permitieron el desarrollo de un PANTANO DE HIERBAS, sin déficit de agua en la cuenca, aumento de la precipitación, mayor erosión hídrica, mayor desarrollo de herbazales. Bajo esta condición se favorece la acumulación de sedimentos finos, en este caso, materiales preferencialmente arcillosos, depositados por decantación, bien seleccionados, enriquecidos o no por MO lábil, así como minerales altamente meteorizados. Los valores más bajos del LOI se presentaron en los siguientes rangos: 0-14, 119-141, 143-237, 307-370, 390-509, 516-622, 634-843, 926-950 cm. Donde hay capas de criptotefras o de líticos volcánicos el LOI baja considerablemente.

En la Figura 4 expresa, de la base al techo, el Calentamiento Medioeval que coincide en el N14 con altos valores del LOI en el rango 623-633 cm, justo donde se encuentran dos paleosuelos “mellizos”, que fueron datados por 14C AMS. La Pequeña Edad del Hielo (LIA), con valores bajos del LOI en casi todo el rango entre 284-461 cm, y aún más bajos entre 307-370 cm; por último, el Calentamiento Moderno coincidiendo con un alto valor del LOI entre 26-54 cm.

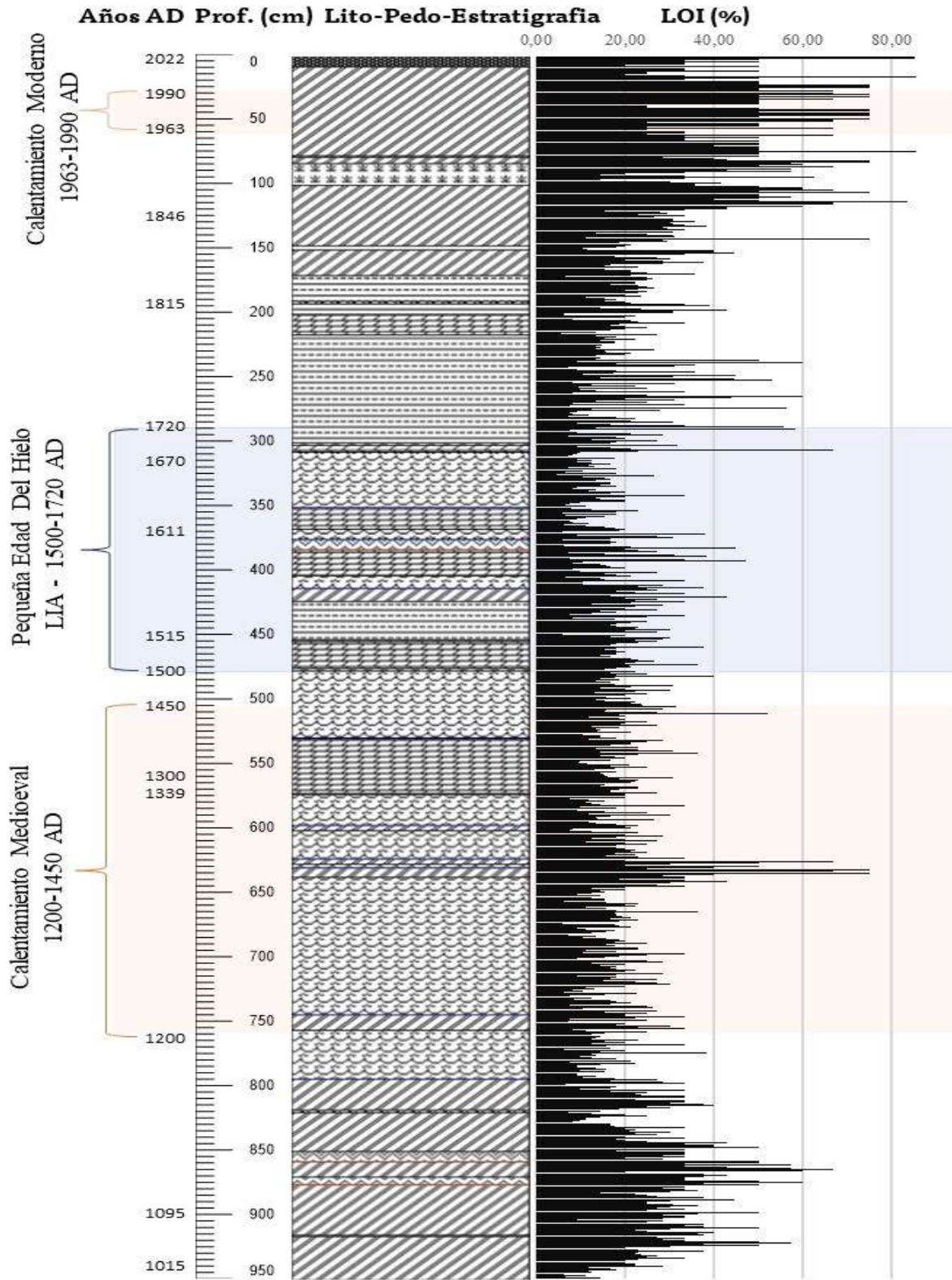


Figura 4. Pérdidas por Ignición (MO%), calculado en el N14, y su relación con respecto a la litología, presencia de criptotefras, capas de líticos volcánicos y paleosuelos, del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia.

#### 4.5 Elementos menores – traza

En los sedimentos del N14, se encontraron los siguientes elementos traza: Ti, V, Ga, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Te, Ta, B, Re, Eu, Yb, Ir, Lu, Sm y Os. Estos elementos y otros no presentes en estos sedimentos son más sensibles a los procesos geoquímicos ya que pueden significar una alta meteorización de los minerales primarios y entran a constituir una buena parte de minerales de arcilla, si, además, contienen elementos pesados como Fe, Mn, Cu, Pb, etc., lo serían de minerales presentes en los limos.

En la Figura 3, estos elementos trazan ayudan a definir y separar los estratos arcillosos de los paleosuelos, en el caso de las arcillas sus porcentajes son mucho mayores que en los paleosuelos. Desde el techo sus valores son muy bajos y van aumentando hacia la base a medida que la presencia de arcillas es más fuerte y dentro de ellas, de acuerdo con su color, cambia mucho la composición, casi en todas es lo mismo, pero puede estar o no un elemento o si esta aumentar o bajar su valor. Hacia la base del núcleo, también disminuyen sus porcentajes, pero no tanto como al inicio y en este caso, podrían estar relacionadas con la evolución de los paleosuelos de la base, demasiado alta. En las arcillas, estos elementos traza, representan un fuerte estado de alteración geoquímica en las rocas de la cuenca, por lo tanto, elementos como Ta, Y, Ti, Zr, Cr, lo estarían corroborando, así como procesos diagenéticos post deposicionales y la geoquímica del material fuente. El Zr y Sn son elementos inmóviles y generalmente están asociados a la misma dinámica de los elementos pesados, más solubles como Fe, Mn, Pb y, a veces, Cr, que ser móviles durante la diagénesis.

#### 4.6 Elementos mayores

Como se pudo leer en los descriptores anteriores (Figura 3), es posible concluir que para los estratos minerales arcillosos, los suelos y los paleosuelos, así como para las capas de tefras o líticos volcánicos, la composición elemental leída por XRF, determino 38 elementos, siendo los más constantes y por orden de magnitud promedia el Si, Fe, Al, Ca, Mg, K, Sn, Yb, Eu, Zr, Ti, S, Cl, Ni, Rb, Sr, V, Mn, Cu, Pb, Ga, Zn, Y, P, Cr, Ir, Re, Os, en algunos casos pueden haber o no otros elementos, pero a veces solo con valores extremos o mínimos, o su cantidad fue cero lo que indica por debajo del nivel de cuantificación del equipo. Como fue el caso del Pt, en otros casos fue tan alta su concentración con respecto al promedio que en los sitios donde se detectaba, solo pocos elementos lo acompañaban, fue el caso del Na, B, Br. El caso del oro, podría considerarse interferencia de sus líneas de fluorescencia con las de otro elemento ya que no se ha podido confirmar su presencia por medios ópticos.

Elementos pesados como Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Mn, son indicativos de condiciones de oxido reducción, las cuales se reflejan

bien en paleosuelos, en especial los encontrados entre 6623-637 cm “paleosuelos mellizos” y ente 794-950 cm.

Dependiendo de los materiales observados en todo el núcleo los porcentajes variaron, en unos casos aumentaban y en otros disminuían, para el caso de las arcillas, se destaca la presencia de Si, Fe, Ca, Al, K y Mg, provenientes de minerales carbonatados, con valores relativamente altos respecto a los de los otros elementos presentes, ellos, constituyen verdaderos marcadores de la ciclicidad geoquímica que se presenta en todos los estratos de este tipo, además, son los que tienen las más altas concentraciones porcentuales, en todos los series analizados del N14. Por esta razón, son estos elementos los que se analizan en detalle, juntamente con el S, ya que ellos permiten enfatizar zonas de cambio y entender mejor la geoquímica de estas y su relación con el paleoclima, Figura 5.

#### 4.7 Relaciones Si/Mg, Ca/Mg, Si/Mg Versus LOI (%)

Teniendo en cuenta el párrafo anterior en cuanto a que son el Si, Fe, Ca, Al, K y Mg, junto con el S, los elementos que podrían ser más contundentes en la caracterización de los materiales presentes en el pantano, se dibujaron las curvas de estos elementos y se buscaron todas las relaciones posibles entre ellos, de estas, se preservaron Si/Ca, Ca/Mg y Si/Mg, porque ellas mostraron y permitieron definir límites y entre ellas y las tendencias vistas ya en las señales de estos elementos por separado. Se procedió entonces, a graficar, estos cocientes versus el del LOI (%), Figura 5. Al relacionar estos cuatro parámetros, se observó que se reforzaron las tendencias y los límites, pudiéndose sin ambigüedad separar zonas, que coincidían con lo que ya se había definido en la lito, la tefro, la pedo y la quimio estratigrafía, lo cual, permite ratificar el papel de la geoquímica y su implicación en los procesos ocurridos en la cuenca dando a entender no solo la alteración de los materiales primarios sino también el papel fundamental en la dinámica de ellos y su posterior diagénesis.

La Figura 5, muestra muy bien el comportamiento de los elementos mayores, los cuales, presentan valores altos o bajos fuertes, casi en las mismas profundidades. Las señales de estos se comparan con las del S, porque, en este caso, los valores de S son muy bajos en todo el núcleo, excepto en el techo y en la base, lo cual, estaría indicando su origen pedogénico, en otros sitios donde los valores donde las concentraciones son relativamente más altas estarían coincidiendo con una capa de criptotefras como en 189, 191 y 192 cm, por ejemplo (p.e.).

En esta misma figura se muestran las relaciones Si/Ca, Ca/Mg y Si/Mg con la curva del LOI (MO%), y su expresión, resulta ser demasiado interesante ya permite definir 8 zonas (ZI a ZIII) que coinciden con valores altos o bajos de los elementos mayores, y casi que, por regla general, donde aumenta el LOI,

disminuyen los cocientes considerados. De todos los cocientes, Si/Mg es el más alto en todo el núcleo, Si/Ca, solo lo es hasta la mitad de la ZIII, mientras que Ca/Mg, es una señal débil hasta la ZVIII, donde aumenta un poco. La zona ZI, marca muy bien el suelo actual y los paleosuelos del techo; ZII y ZVIII, los paleosuelos más evolucionados e interceptados por tefras o pequeños estratos arcillosos, son en estas dos zonas donde se podría inferir materiales minerales altamente meteorizados. ZII y ZVII, zonas de transición con minerales igualmente meteorizados predominando en ellas. De la ZII a la ZVI se diferencian estratos minerales arcillosos en los cuales se pueden establecer diferencias

claras, p.e., ZIII y ZV, predominan arcillas chocolate, mientras que en ZIV, arcillas verdosas y en ZVI, arcillas azulosas. En esta última gráfica de LOI vs Relaciones elementales, también se mantiene “cierta ciclicidad”, tanto en las relaciones elementales como en el contenido de MO, dando la impresión, como si se tratará de “ciclos repetitivos en el tiempo” que podrían estar relacionados con climas cálidos-húmedos asociados a una disminución de la MO (estratos minerales arcillosos preferencialmente), y climas cálidos-secos a un aumento de la MO (paleosuelos y suelo actual).

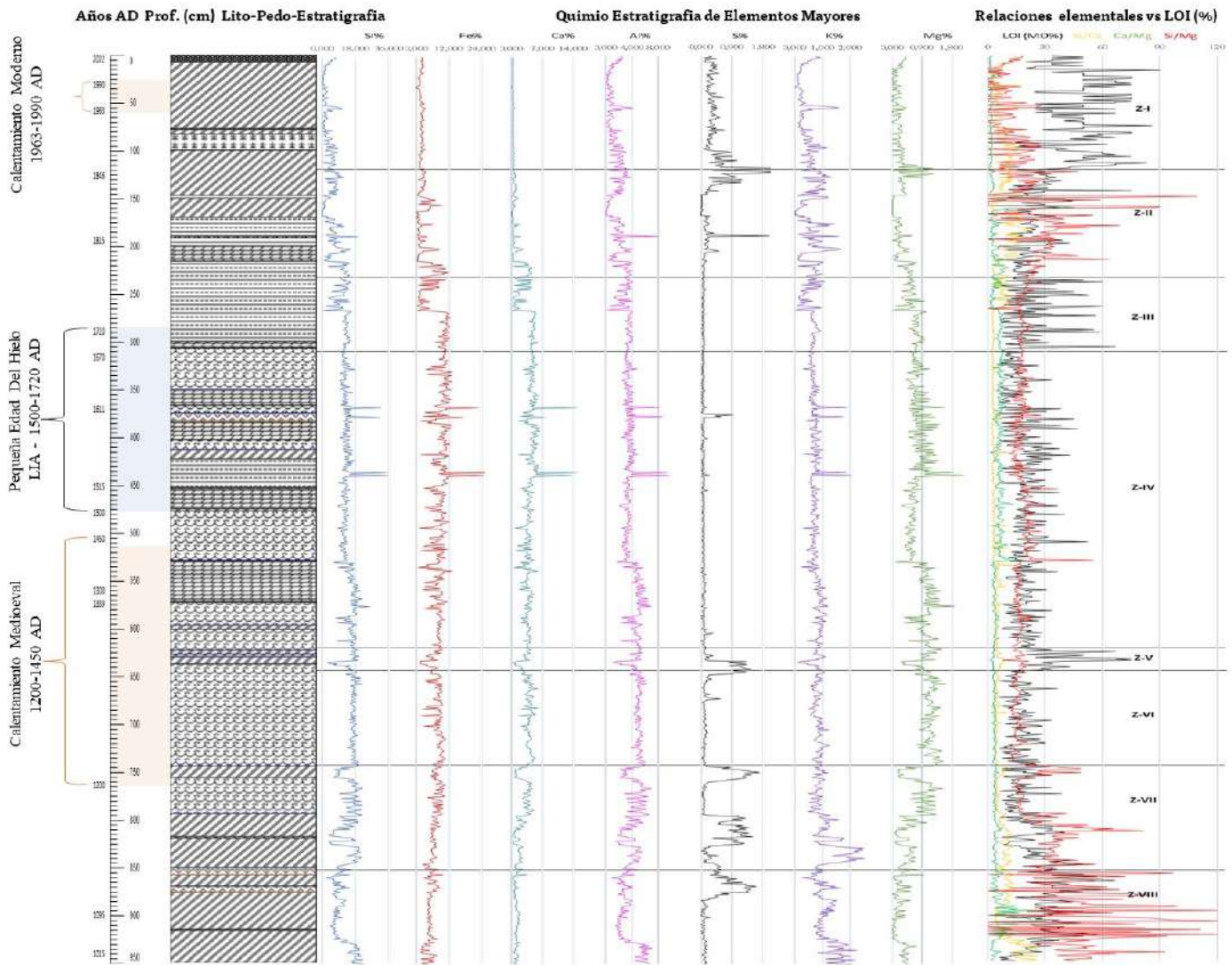


Figura 5. Sensor químico estratigráfico de los elementos mayores (Si, Fe, Ca, Al, K, Mg y S) y las relaciones Si/Ca, Ca/Mg y Si/Mg, con el LOI (%), de los sedimentos del N14, Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia



## 5. DISCUSIÓN

Por lo observado a través de los sensores paleoclimáticos que han reflejado los diversos procesos climáticos, geológicos, geoquímicos y ambientales ocurridos en la Bramadora, en este artículo se considera que el nombre actual que debe asumirse en adelante para el Humedal o Pantano La Bramadora debe ser el de “Pantano La Bramadora”, según la [AcademiaLab \(2023\)](#), un “pantano es un humedal boscoso” como es el caso, al menos, en las últimas décadas.

Si bien la mayoría de los detritos que están en ese pantano provienen de las rocas y saprolitos de la Formación Amaga y quizás en menor escala de las terrazas torrenciales del costado Sur, no hay que olvidar los aportes de tefras por vía aérea. Esos detritos han sido moldeados por procesos de transporte, depositación, químicos y de pedogénesis dentro del pantano, mediados por agua de escorrentía proveniente exclusivamente de la precipitación registrada y por dinámicas de los ecosistemas, por lo menos, durante los últimos 1000 años, en dicha cuenca. Lo interesante es que es una cuenca relativamente pequeña, pero de una gran actividad y con excelentes marcadores de los eventos de precipitación y volcanismo, entre otros, y de cambios climáticos.

En el Pantano La Bramadora, tanto la materia orgánica como inorgánica, tienen un origen fundamentalmente alóctono, la disposición y composición del suelo actual, de las turbas, de los paleosuelos y de los estratos minerales arcillosos está altamente relacionada con la dinámica de la propia cuenca como son: procesos geológicos de meteorización de materiales sedimentarios finos y medios; eventos de precipitación extrema que han ocasionado erosión hídrica, arrastre y acumulación de materiales en la cuenca principalmente de origen inorgánico y quizás en menor medida orgánicos; eventos de sequía que han permitido la formación de neominerales y la mineralizado la materia orgánica (procesos diagenéticos propios de los materiales acumulados), y las actividades antrópicas que se han ejecutado en el último milenio en la zona que para bien o para mal, han transformado durante varias épocas el pantano de acuerdo a la actividad imperante en el momento, ya sea, ganadería, piscicultura o agricultura, o la instalación de unidades de vivienda en las zonas de amortiguación, dejando marcas que indican que este también es un sensor de cambio.

Las rocas sedimentarias, las características hídricas del pantano, así como, los eventos de precipitación y/o sequía, quedaron impresas en los sedimentos como sensores paleoclimáticos y permitieron deducir juntamente con la señal del LOI, no solo paleoclima, sino también los procesos de erosión, sedimentación, meteorización, neoformación de minerales y pedogénesis, ocurridos,

al menos, en el último milenio. La Figura 6 resume lo que paso en el Pantano La Bramadora en el último milenio y se destaca algunos eventos ocurridos entre 1015 y 2022 AC.

La Bramadora es una microcuenca cerrada, discurre sobre una llanura aluvial de régimen torrencial, solo recibe aportes de sus tributarios, que interceptan la llanura en forma de pequeños abanicos. En esta llanura existía un suelo de 35 cm de espesor que incluye en el techo una microtefra de 2 cm (1145-1146 AC), este suelo se pudo haber desarrollado bajo condiciones de aridez, hoy pudiera ser clasificado como *Xeric argigypsis* ([Soil Survey Staff, 2014](#)), dada la presencia de anhidrita, este paleosuelo posiblemente es muy viejo. Condiciones climáticas más favorables, no tan áridas, dieron paso a la formación de otros dos paleosuelos que suprayacen el anterior, ambos terrestres formados bajo un clima cálido seco no tan árido y que están separados por una microtefra, su evolución pudo durar alrededor de 120 años (1030-1150 AC).

El desarrollo del Pantano La Bramadora, propiamente, pudo haber comenzado hacia el año 1050 AC, y se pudo haber formado a partir de un abanico torrencial de gran tamaño localizado en la parte inferior del valle aluvial, que ocasionó el represamiento del agua y sepultó los suelos preexistentes, dejando una lámina de agua, persistente todo el año. Esto se evidencia por la presencia de sendos estratos de arcilla bandeada y/o laminada, que están intercaladas por paleosuelos de escaso espesor. Las arcillas indicativas de climas cálidos húmedos y ambientes de pantano herbal (630 cm de espesor). Las de color gris y verdoso revelan la persistencia de la lámina de agua durante todo el año, y las de color chocolate expondrían un nivel freático rasante, agua oscilante.

Dentro de esta serie de acillas, se evidencian eventos paleoclimáticos y volcánicos globales que quedaron impresos en ellas o en los paleosuelos, tales como:

a) Entre 1200-1450 AC, el Calentamiento Medioeval. Dentro de este intervalo, se reporta en 1257, la explosión del volcán Samalas en Indonesia. En 1452, la del Kuwae en Japón, y en 1458, el Kubie. En 1477, el volcán Bardarbunga en Islandia, aunque su influencia es pequeña, pudo haber frenado el calentamiento que se estaba registrando hasta ese momento. Justo en la parte media de este intervalo, la presencia de dos paleosuelos “mellizos”, marcadores de dos periodos de sequía en Colombia.

b) Entre 1500-1720 AC, se presenta la Pequeña Edad del Hielo (LIA), que estaría acorde con la presencia de los estratos arcillosos en el pantano, la temperatura en todo el globo bajo y se aumentaron las precipitaciones, en la cuenca se registra erosión pluvial fuerte mediada por cambios pequeños de mejoramiento climático conexos con la presencia de paleosuelos. Se registra, además, actividad volcánica en 1515, del Popocatepetl, México; en 1524 y 1527, la del Nevado del Ruíz en Colombia cuyas

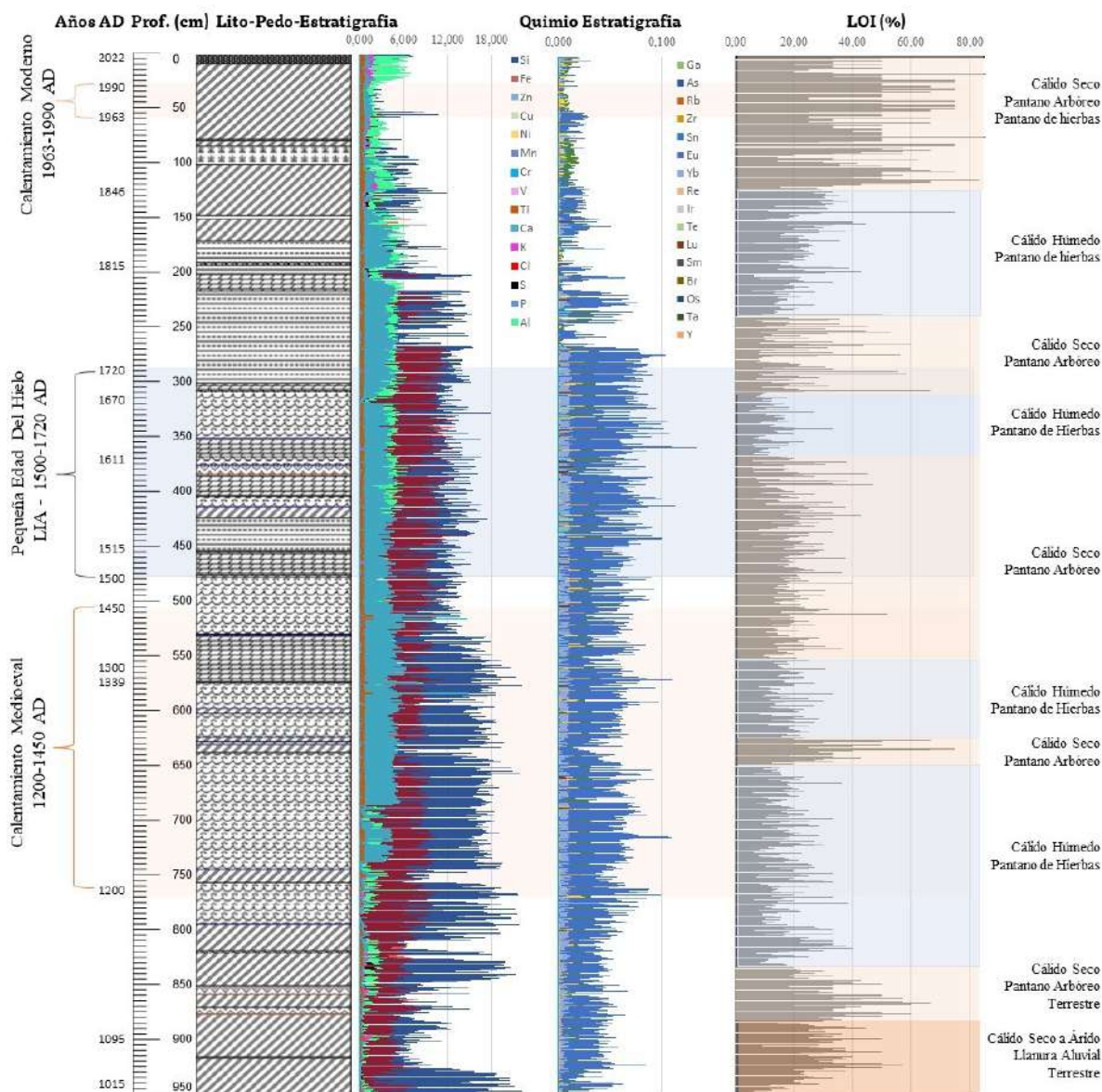


Figura 6. Lito, tefro, pedo y quimio estratigrafía en los 950 cm de sedimentos del Pantano La Bramadora. En la figura también se muestra, al menos, en el último milenio, evidencias del Calentamiento Moderno entre 26-54 cm (1990-1963 AC), de la Pequeña edad de hielo (LIA), entre 284-461 cm (1500-1720 AC), y del Calentamiento medioeval, entre 511-715 cm (1200-1450 AC).

cenizas quedaron registradas en el N14 a una profundidad de 439 y 436 cm, respectivamente. En 1547, otra vez entra en actividad el Nevado del Ruíz y en 1559-1560, el Galeras. En 1574, el volcán Laki en Islandia.

En 1611, se registra un aumento de manchas solares en todo el globo. En 1720, inicia una fase fría y seca y termina la Pequeña Edad de Hielo (LIA). En 1783, el volcán Laki vuelve a hacer erupción, afectando climáticamente especialmente al Ártico. Los anillos de los árboles estudiados en Nome, en la costa de Alaska, señalan aquel verano como uno de los más fríos del milenio en aquella región. En 1800, se registra una debilidad solar entendida

como un Mínimo Dalton. En 1805, el Nevado del Ruíz hace de nuevo erupción, esta se vez queda reflejada en los sedimentos como dos capas de criptotefras a una profundidad de 191 y 192 cm. Del mismo modo, la explosión del volcán Tambora en Indonesia en 1815, a una profundidad de 189 y 190 cm, del N14.

Pequeña edad de hielo (LIA), entre 284-461 cm (1500-1720 AC), y del Calentamiento Moderno entre 26-54 cm (1990-1963 AD). Con la gráfica del LOI se define el paleoclima y los paleoambientes desarrollados.

Nuevas explosiones del Nevado del Rúi se registran en 1828, 1831 y 1845 AC. En 1846, la del volcán Quizapu en Chile.

En 1882 AC, se presenta otra sequía en Colombia que favoreció la formación de los paleosuelos del techo guardados preservados en el Pantano La Bramadora, lo cual, se manifestó a través de una progresiva disminución de la precipitación (disminución de Typha y aumento de plantas de borde de pantano y de la vegetación regional, bajo ambiente lacustre, reflejado en el pantano como un paleosuelo turboso entre 113-170 cm de profundidad). En 1983, se registra la explosión del volcán Krakatoa, en Indonesia, percibida en un 10% del globo terráqueo, lo cual incremento la temperatura media del planeta de 0,5°C, y entre 1850-1900 de 1°C, fuerte regresión de los glaciares, erosión por aumento del nivel del mar y disminución en los caudales de los ríos tropicales.

En 1903, 1906, 1909 AC, se registran eventos Niña; en 1910, la temperatura global sube a 7°C. Entre 1915-1919, otro evento Niña. Entre 1925-1935, se da presenta otro periodo de sequía, fuerte, el cual queda registrado en el pantano como ausencia de plantas acuáticas y del espejo de agua. Alternaron *Cyperaceae* y helechos de borde, el aporte orgánico fue bajo. En 1932, el Volcán Quizapu en Chile hace erupción. Entre 1933 a 1938 AC, otro evento Niña marca la transición de un clima seco a un clima ligeramente húmedo y estacional. En 1936, el volcán Galeras en Colombia hace erupción. Se registra un evento Niño entre 1939-1941 AC. Luego, la temperatura global baja levemente entre 1944-1978 AC, registrándose varios eventos Niña en 1949, 1954, 1955-1956 AC.

a) Entre 1963-1990, comienza el Calentamiento Moderno, en este periodo se registra una fuerte actividad del Nevado del Ruíz, especialmente en 1984, 1985 a 1988 AC. En 1991, el Pinatubo en Filipinas hizo erupción.

En 1998, la temperatura global baja lentamente y se registran varios eventos Niña en Colombia entre 1998-2000, 2007-2008, 2010-2012 AC, registradas en el Pantano La Bramadora por un marcado dominio de *Cyperaceae* y el aumento *Achatocarpus sp.*, *Anacardiaceae*, *Amyris sp.*, *Bursera simaruba*, *Cecropia peltata*, *Moraceae* y *Piperaceae*, asociado a la transición hacia un clima más húmedo y a la intervención antrópica. En el 2017, un Niño costero marca un leve mejoramiento climático que se ha mantenido hasta el presente.

En el 2022 AC, se recuperaron los N13 y N14 en el Pantano la Bramadora y se inició su investigación.

En este pantano, gran parte de la materia orgánica tiene un origen autóctono y la disposición y composición del suelo actual, de las turbas, de los paleosuelos y de los estratos arcillosos está altamente relacionada con el balance entre la precipitación y la evapotranspiración de la propia cuenca.

Los eventos de precipitación han ocasionado erosión hídrica y arrastre de partículas y estos se han acumulado como

sedimentos quedando como sensores paleoclimáticos - lito, pedo, quimio-estratigráficos y la señal del LOI. El bandeamiento y/o laminación de las arcillas gris verdosas/azulosas y chocolate, así como la composición química elemental definen su “ciclicidad sedimentológica” que esta mediada o interrumpida por capas de tefras y/o criptotefras, y/o por paleosuelos.

El LOI (%) ayuda en la definición de paleoclimas y de los ambientes sedimentarios, así: valores elevados se corresponden con bajos niveles freáticos (climas con estaciones secas más prolongadas), que permiten el desarrollo de un Pantano Arbóreo, con déficit de agua en la cuenca, disminución en la precipitación, incorporación alta de materia orgánica al sedimento por expansión del bosque de árboles anfibios. Por el contrario, valores bajos del LOI, podrían corresponder a climas que favorecen altos niveles freáticos hasta rasantes con el nivel del terreno, que permiten el desarrollo de un Pantano de Hierbas, sin déficit de agua en la cuenca, aumento de la precipitación, mayor erosión hídrica, mayor desarrollo de herbazales. Bajo esta condición se favorece la acumulación de sedimentos finos, arcillosos, depositados por decantación, bien seleccionados, enriquecidos o no por materia orgánica lábil, así como minerales altamente meteorizados.

## 6. CONCLUSIONES

Los sensores paleoclimáticos - lito, pedo, quimio estratigráfica, así como las capas de criptotefras y de líticos volcánicos y la señal del LOI - observados en los sedimentos del Pantano La Bramadora, dan cuenta de los diversos eventos paleoclimáticos ocurridos en el pantano, al menos durante el último milenio.

La Bramadora es una microcuenca cerrada, discurre sobre una llanura aluvial de régimen torrencial, solo recibe aportes de sus tributarios, que interceptan la llanura en forma de pequeños abanicos. Tres paleosuelos en la base con condición de aridez (presencia de anhidrita) fueron sepultados por el inicio del pantano hacia el año 1050 AC, a partir de un abanico torrencial que ocasionó el represamiento del agua; sendos estratos de arcilla bandeada y/o laminada, que están intercaladas por paleosuelos de escaso espesor, así lo demuestran.

Las arcillas indicativas de climas cálidos húmedos y ambientes de pantano herbal (630 cm de espesor). Las de color gris y verdoso revelan la persistencia de la lámina de agua durante todo el año, y las de color chocolate expondrían un nivel freático rasante, agua oscilante.

En el N14, se observaron sendos estratos minerales arcillosos bandeadas y/o laminadas y/o laminadas cuyos colores variaron entre “arcillas gris verdosas”, “arcillas gris azulosas” y “arcillas chocolate”. El bandeamiento y/o laminación que presentan

las arcillas define una “ciclicidad sedimentológica” que esta mediada o interrumpida por capas de criptotefras, capas de líticos volcánicos y/o por paleosuelos. Limos y arenas, tienen pequeña expresión en todo el núcleo, los limos están más asociados a la presencia de paleosuelos limosos y las arenas tanto a paleosuelos arenosos como a las capas de criptotefras o de líticos. Los paleosuelos, están presentes en todo el núcleo, son muy espesos tanto en el techo (170 cm de paleosuelos, mediados por pequeñas capas de arcilla y una de criptotefra) como en la base (156 cm de paleosuelos, mediados por dos capas de criptotefras).

Los paleosuelos del techo indican una condición ambiental de clima cálido seco en donde se desarrolló un pantano arbóreo y conexo un pantano de hierbas, con déficit de humedad atmosférica; el de la base un clima cálido seco que permitió el desarrollo de un pantano arbóreo terrestre, con un déficit de humedad extremo, la presencia de anhidrita estaría indicando una gran sequía. El espesor sumado en los paleosuelos del techo y la base, admitieron el desarrollo de árboles y arbustos anfibios de gran tamaño y la presencia de un herbazal potente, tal como se ve hoy día el pantano. Los estratos arcillosos que reflejan climas cálidos húmedos.

La química estratigráfica, muestra la ciclicidad temporal de los materiales y precisar límites líticos, geoquímicos y de paleosuelos, en especial, los elementos traza, definen la razón del cambio geoquímico que presentan las bandas y/o láminas en las arcillas.

El LOI define los climas y los ambientes registrados en el pantano así: valores elevados del LOI pudieran corresponder a climas Cálidos-Secos, que permitieron el desarrollo de un Pantano Arbóreo, con déficit de agua en la cuenca, disminución en la precipitación, incorporación de MO inorgánica, menor erosión hídrica, mayor contenido arbóreo (expansión del bosque), desarrollo de árboles híbridos (terrestres y anfibios). Bajo esta condición se da el desarrollo del suelo (paleosuelos), con abundante MO en diferentes estados de descomposición. Tanto en el techo como en la base, paleosuelos de gran espesor, en el techo mediados por la presencia de herbazales, y en la base, típico de un bosque terrestre. Estos valores más altos del LOI se presentaron en los siguientes rangos: 15-118, 142, 238-306, 371-389, 510-515, 623-633, 844-925 cm. Valores bajos del LOI, podrían corresponder a climas Cálidos-Húmedos, que permitieron el desarrollo de un Pantano de Hierbas, sin déficit de agua en la cuenca, aumento de la precipitación, mayor erosión hídrica, mayor desarrollo de herbazales. Bajo esta condición se favorece la acumulación de sedimentos finos, en este caso, materiales preferencialmente arcillosos, depositados por decantación, bien seleccionados, enriquecidos o no por MO lábil, así como minerales altamente

meteorizados. Estos valores bajos se presentaron en los siguientes rangos: 0-14, 119-141, 143-237, 307-370, 390-509, 516-622, 634-843, 926-950 cm. Donde hay capas de criptotefras o de líticos volcánicos el LOI baja considerablemente.

Todos los sensores paleoclimáticos fueron necesarios para reconstruir y entender la historia del pantano, pero el sensor químico estratigráfico y el LOI, son de tal importancia, que podrían ser los que mejor expresaran el fenómeno, si se tuviera que elegir uno entre todos, sería el LOI, además, porque es barato y de fácil acceso. Si se requiere conocer la edad en años calendario (AC), entonces las criptotefras serían lo adecuado, esto, teniendo en cuenta de que se trabaja con núcleos de sedimentos lacustres de esta temporalidad, y que no hay, hasta hoy, suficientes investigaciones como para realizar una amplia discusión o comparar los resultados entre sí, por lo menos en la parte continental, y específicamente en Colombia.

Este registro pedo sedimentario del Pantano La Bramadora, guarda evidencias de eventos extremos de precipitación que podrían estar correlacionados con eventos globales y locales como eventos volcánicos; la persistencia en la tasa de sedimentación (aproximada de 1 cm/año); excesos de pluviosidad global en 1816, ocasionados por la explosión del Tambora en 1815. En 1800, el Mínimo Dalton entendido como debilidad solar; entre 1500 y 1720, el registro de la Pequeña Edad de Hielo (LIA); entre 1200-1450 el Calentamiento Medioeval (dentro de este periodo se encuentran los paleosuelos “mellizos” descrito aquí; además, [Plazas et al. \(1993\)](#) le atribuyen el decaimiento de la cultura Zenú en Colombia, y el Calentamiento Moderno. Finalmente, a través de todo el registro, sendos periodos de sequía (eventos Niño), que permiten la formación de paleosuelos y/o de periodos de lluvias, algunas extremas (eventos Niña), que dan paso a la acumulación de sendos estratos de arcillas bandeadas y/o laminadas y/o laminadas.

## MATERIAL SUPLEMENTARIO

Anexo 1. Descripción del Núcleo 14 (N14).

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaramos que el artículo no presenta conflicto de intereses.

## RECONOCIMIENTOS

Al Ingeniero Jorge Andrés Calderón profesor de la Universidad de Antioquia y los grupos de Investigación GAIA y CIDE-MAT de la Universidad de Antioquia, por el apoyo tecnológico y la confianza. A mi Alma Mater, Universidad de Antioquia, a La Facultad de Ingeniería, a Luna, por su acompañamiento

constante; en especial, agradecemos los valiosos comentarios de los revisores anónimos.

## REFERENCIAS

- AcademiaLab., (2023). CC BY-NC-ND info@academia-lab.com. En: <https://academia-lab.com/enciclopedia/pantano/>
- Betancurth M.L., y Cañón B., J.E., (2021). Paleoenvironmental Interpretation of Last Millennium Sediments in the Mariaga Swamp, Atrato Delta, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Vol. 31(1), enero-junio. ISSN: 0124-8170e-ISSN: 1909-7735. pp. 9-24.
- Cepeda, H. (2020). Quinientos años de documentación histórica de actividad del volcán Galeras: escenarios eruptivos. Servicio Geológico Colombiano.
- Consultoría Colombiana S.A CCS (2017): Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para la construcción de la segunda calzada entre el Túnel de Occidente y Santa Fe de Antioquia. Proyecto "Estudios Ambientales Concesión MAR 1". v1.1. No organization. Dataset/Occurrence. [https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=flora\\_fauna\\_mar-1&v=1.1](https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=flora_fauna_mar-1&v=1.1)
- Espinal, L.S., (1992). Geografía ecológica de Antioquia. Zonas de vida. Editorial Lealón, Medellín. Universidad Nacional de Colombia, Facultades de Ciencias y Ciencias Agropecuarias. 146pp. Red Scielo. [http://www.scielo.co/scielo.php?script=sci\\_nlinks&ref=000127&pid=S0123-3068200700010001100008&lng=es](http://www.scielo.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000127&pid=S0123-3068200700010001100008&lng=es)
- Espinosa B. A., (2001). Erupciones históricas de los volcanes colombianos (1500-1995). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras No. 16. Edición cofinanciada por la Universidad del Quindío. ISBN: 958-9205-19-4 Obra completa. ISBN: 958-9205-43-7 Volumen. BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA 2001.
- Flórez-Molina, M.T., Parra-Sánchez, L.N. y Calderón-Gutiérrez, J.A. (2023). Evidencias de eventos extremos de precipitación y de explosiones volcánicas entre 1455-2022, A.D, en el humedal la Bramadora, Antioquia, Colombia. *Boletín De Ciencias De La Tierra*, 53, pp. 9 - 24. DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct.n53.108060>
- Gornitz, V. (2009). *Paleoclimate Proxies, An Introduction*. 10.1007/978-1-4020-4411-3\_171.
- Herrera D. A., y Del Valle J. I. (2011). Reconstrucción de los niveles del río Atrato con anillos de crecimiento de *prioria copaifera*. *Dyna*, Vol. 78, No. 169, pp. 121-130. Medellín
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. "Palaeoclimatology". En *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Editado por S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. M. B. Tignor, H. Leroi-Miller Jr. y Z. Chen, pp. 433-497. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014. [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_All\\_Topics.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf)
- León E. (2020). Cambio paleoclimático en el pasado pecolombino. Parte 1. Métodos, drivers, proxies, incluye tablas. Museo Nacional de Arqueología, Antropología e Historia del Perú. 75p. En: [https://mnaahp.cultura.pe/sites/default/files/cambio\\_paleoclimatico\\_en\\_el\\_pasado\\_precolombino.pdf](https://mnaahp.cultura.pe/sites/default/files/cambio_paleoclimatico_en_el_pasado_precolombino.pdf)
- Lorius C., J. Jouzel; D. Raynaud, G. Weller, I. N. McCave and C. Moore. (1992). The Ice Core Record: Past Archive of the Climate and Signpost to the Future [and Discussion]. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*. Vol. 338, No. 1285, Antarctica, and Environmental Change (Nov. 30, 1992), pp. 227-234 (8 pages) Published By: Royal Society, Journal.
- Luque Marín, J.A. (2003). El Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6.000 años. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, Barcelona (España), 384 pp.
- Mayewski, P. A. (2008). "Paleoclimate from Ice Cores. A Framework for Archaeological Interpretations". En *El Niño, Catastrophism, and Culture Change in Ancient America*, pp: 15-32. *Dumbarton Oaks Research Library and Collection*. Harvard University Press.
- Moore, I.D., R. B. Grayson, A. R. (1991). Ladson Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Pages: 3-30 First Published: January/March 1991.
- Plazas, C., Falchetti, AM, Sáenz, J. y Archila, S. (1993). La Sociedad Hidráulica Zenú. Estudio arqueológico de 2000 años de historia en las llanuras del Caribe Colombia Bogotá: Banco de la República, Museo del Oro. [https://www.academia.edu/41133439/LA\\_SOCIEDAD\\_HIDR%C3%81ULICA\\_ZEN%C3%9A](https://www.academia.edu/41133439/LA_SOCIEDAD_HIDR%C3%81ULICA_ZEN%C3%9A).
- Restrepo Correa A. (2004). Estudio de reconstrucción de la historia de la flora del Bosque Seco Tropical En El Occidente medio de Antioquia, con base en el análisis e identificación del polen fósil depositado en sedimentos de la Cuenca de

Santa Fe de Antioquia. Programa Biodiversidad Para El Desarrollo. Proyecto Manejo y Conservación de Flora. Contrato No. 5018 de 2003. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58755/Din%C3%A1mica%20del%20clima%20y%20Version%205.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Soil Survey Staff (SSS). (2014). Keys to Soil Taxonomy. Eleventh Edition. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C. 338 p.

Villalba, R., Lara, A., Boninsegna, JA, Masiokas, M., Delgado, S., Aravena, JC, ... & Ripalta, A. (2003). Cambios de temperatura a gran escala en los Andes meridionales: variaciones del siglo XX en el contexto de los últimos 400 años. Variabilidad y cambio climático en regiones de gran elevación: pasado, presente y futuro, 177-232.