

Research article

Paleosuelos marcadores de periodos de aridez en el último milenio conservados en el Pantano La Bramadora, Sopetrán, Colombia

Paleosoils markers of periods of aridity in the last milenio preserved in the Pantano La Bramadora, Sopetrán, Colombia.

María Teresa Flórez-Molina¹ , Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo² , Luis Norberto Parra-Sánchez² 

¹Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

²Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia

RESUMEN

El Pantano la Bramadora se ubica justo en la parte distal de este valle coluvio-aluvial y recibe tanto los flujos de agua subterráneos y superficiales intermitentes que recorren estos valles de la cuenca. El año 1050 AC marca el desarrollo permanente del pantano por un represamiento, a partir del cual, comienzan a desarrollarse paleosuelos, el más inferior entre 1220-1291 AD y el superior entre 1340-1392 AD. Estos evolucionaron bajo condiciones de extrema aridez. Aportes continuos de sedimentos permitieron la acumulación de estratos de arcilla bandeada/laminada, mediadas por períodos más secos que consintieron el desarrollo de otros paleosuelos.

El objetivo de este artículo es mostrar cómo algunos de los paleosuelos del núcleo N14 marcan eventos de aridez ocurridos en el último milenio. Para su desarrollo se obtuvo un núcleo de sedimentos de 9.5 m, el cual se seccionó y analizó al centímetro, tres dataciones por 14C permitieron definir la edad de algunos paleosuelos.

Como conclusión general, en el N14 se resaltan seis paleosuelos formados bajo un régimen de humedad variable y régimen de temperatura isohipertérmico, clasificados, de base a techo, así: Ustic Haplogypsids, Ustertic Haplocambids y Aquertic Eutrudepts (entre 916-950 cm de profundidad); Torrertic Dystrustepts (entre 870-882 cm); Typic Dystruderts y Aridic Endoaquerts (entre 623-636 cm). Entre 19-144 cm un Typic Haplifibrist y entre 1-18 cm, el suelo actual un Typic Endoaqualf. Los dos paleosuelos de la base, Aridisoles, constituyen el único registro que presenta esta condición en Suramérica en el último milenio y podría coincidir con el Periodo Cálido Medieval.

Palabras clave: Aridisols, Vertisols, Inceptisols, Alfisols, Paleoclima, Paleoambiental, Sedimentos.

ABSTRACT

The Pantano La Bramadora is located just at the distal end of this colluvio-alluvial valley and receives both groundwater and intermittent surface water flows that flow through these valleys of the basin. The year 1050 BC marks the permanent development of the swamp due to damming, from which paleosols began to develop, the lowest between 1220-1291 AD and the upper between 1340-1392 AD. These evolved under extremely arid conditions. Continuous sediment inputs allowed the accumulation of banded/laminated clay strata, mediated by drier periods that allowed the development of other paleosols.

The objective of this article is to show how some of the paleosols in core N14 mark aridity events that occurred in the last millennium. For its development, a 9.5 m sediment core was obtained, which was sectioned and analyzed to the centimeter; three 14C dating allowed the age of some paleosols to be defined.

As a general conclusion, in N14 six paleosols are highlighted, formed under a variable humidity regime and isohyperthermic temperature regime, classified, from base to top, as follows: Ustic Haplogypsids, Ustertic Haplocambids and Aquertic Eutrudepts (between 916-950 cm deep); Torrertic Dystrustepts (between 870-882 cm); Typic Dystruderts and Aridic Endoaquerts (between 623-636 cm). Between 19-144 cm a Typic Haplifibrist and between 1-18 cm, the current soil a Typic Endoaqualf. The two paleosols at the base, classified as Aridisols, constitute the only record that presents this condition in South America, in the last millennium and could coincide with the Medieval Warm Period. The objective of this article is to show how some of the paleosols of core N14 mark aridity events, which occurred in the last millennium.

Keywords: Aridisols, Vertisols, Inceptisols, Alfisols, Paleoclimate, Paleoenvironmental, Sediments.

Citación: Flórez-Molina, M.T., Jaramillo-Jaramillo D.F., Parra-Sánchez, L.N. (2025) Paleosuelos marcadores de períodos de aridez en el último milenio, conservados en Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. Boletín Geológico, 52(2)

<https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.52.2.2025.751>

Manuscrito recibido: Febrero 21, 2025

Corrección recibida: Noviembre 17, 2025

Manuscrito aceptado: Diciembre 7, 2025



This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License

Boletín Geológico: ISSN: impreso; 0120-1425, ISSN digital: 2711-1318

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca de La Bramadora, ubicada en el municipio de Sopeña, departamento de Antioquia, Colombia, está sometida a un régimen de torrecialidad hídrica y a la coluvación de materiales finos arrastrados por arroyadas difusas en las laderas o concentradas en los cauces, dando origen a abanicos en la llanura aluvial. El Pantano la Bramadora se ubica justo en la parte distal de este valle coluvio-aluvial y recibe tanto los flujos de agua subterráneos como los superficiales intermitentes que recorren estos valles de la cuenca. Para Flórez et al. (2023b), el año 1050 AC (Años Calendario) marca el desarrollo permanente del pantano que se formó como consecuencia del represamiento del agua por un abanico torrecial transversal al valle principal.

Una vez se da el represamiento comienzan a desarrollarse los paleosuelos inferiores (el de la base entre 1220-1291 AD (Anno Domini) y el superior entre 1340-1392 AD. Estos evolucionaron bajo condiciones de extrema aridez. Aportes continuos de sedimentos arrastrados por la escorrentía hasta el pantano permitieron la formación de una lámina de agua constante, mezclada con materiales arcillosos que dieron paso a la acumulación de estratos de arcilla bandeadas laminadas gris-azulosas, gris-verdosas y chocolate, mediadas por períodos más secos que llevaron al desarrollo de otros paleosuelos, destacándose en la parte media del núcleo N14 (Flórez et al., 2023a) dos, nombrados como “mellizos” (Flórez et al., 2023b), que se formaron como respuesta a la desaparición de la lámina de agua debida a una fuerte sequía registrada posiblemente entre 1482-1644 AD. Entre estos paleosuelos y otros de menor espesor, se presentan capas de arcillas bandeadas y laminadas que varían en color entre grises, verdosas, azulosas y chocolate, así como turbas, ubicándose en el techo, el suelo actual. Toda esta sedimentación está altamente relacionada con el balance entre la precipitación, evapotranspiración y erosión hídrica de la propia cuenca; el bandeoamiento y/o laminación de las arcillas, su color, así como la geoquímica elemental definen la “ciclicidad sedimentológica” que está mediada o interrumpida por capas de criptotefras, y/o por los propios paleosuelos que son indicativos de cambios climáticos drásticos (Flórez y Parra, 2025).

Los estudios sobre el clima del último milenio son particularmente importantes para confrontar el actual cambio climático, en particular el lapso entre los años 1000-1300 Años Calendario (AC). El último milenio tiene un interés particular porque durante el mismo se han registrado eventos tan notables como el Calentamiento Medieval, La Pequeña Edad de Hielo (LIA) y el Calentamiento Moderno (Flórez y Parra, 2025). Al primero se le atribuye el colapso de varias culturas como la Maya en Centroamé-

rica (Hodell et al., 1995; Leyden, Brenner & Dahlin, 1994; Brenner et al., 2001), Tiwanaku en Bolivia (Orlove, 2005) y, probablemente, la cultura Zenú en Colombia (Plazas et al., 1993). La Pequeña Edad de Hielo (LIA) (Ruddiman, 2008; Luterbacher et al., 2004), asociada a períodos de menor actividad solar, fue registrada en el glaciar de Quelccaya en Perú, como una fase fría y húmeda entre 1500 y 1720, y una fría y seca entre 1720 y 1880 (Thompson et al., 1986).

El objetivo de este artículo es mostrar cómo algunos de los paleosuelos del núcleo N14 marcan eventos de aridez ocurridos en el último milenio.

2. ESTADO DEL ARTE

Marshall et al. (2025), indican que la variabilidad climática en el último milenio (últimos 1000 años) está dominada por los efectos de erupciones volcánicas de gran magnitud; sin embargo, dicen que existe una discrepancia de larga data entre el enfriamiento de la superficie simulado por modelos derivado de los anillos de los árboles. Utilizan el modelo del sistema terrestre del Reino Unido (UKESM) para simular el clima del último milenio (1250-1850) con base en emisiones volcánicas de SO₂, promedian todas las erupciones de gran magnitud y encuentran un enfriamiento de verano similar en el hemisferio norte (NH). Para erupciones tropicales de mayor magnitud, en 1257 (Monte Samalas) y 1815 (Monte Tambora), algunos modelos, incluido el UKESM1, sugieren un enfriamiento estival de NH más pequeño que concuerda mejor con los registros de anillos de árboles. Estos resultados sugieren que, para las erupciones tropicales más grandes, la distribución espacial del aerosol puede explicar algunas de las discrepancias entre el enfriamiento simulado por el modelo y el derivado de los anillos de los árboles.

Flórez y Parra (2025) muestran como la presencia de criptotefras en los sedimentos del pantano podrían coincidir con erupciones volcánicas con VEI mayor de 9, como la del Monte Samalas, Indonesia, en 1257, que impactaron notoriamente el clima global produciendo en el trópico y subtropical un calentamiento que condujo a sequías mediadas por períodos de lluvias ocasionales y fuertes.

Flórez y Parra (2024b), resaltan el porcentaje estimado de granos gruesos como determinante para evaluar eventos de paleoprecipitación, escorrentía y/o torrecialidad. Aspectos como la granulometría, la presencia de microcomponentes y su grado de deterioro, los minerales de neoformación, la geoquímica, la presencia de partículas carbonizadas y las pérdidas por ignición le permitieron a estos autores detectar el efecto que tuvieron, durante el último milenio, eventos de precipitación/sequía extremos, escorrentía, torrecialidad, incendios y el comportamiento del nivel freático sobre la sedimentación y sobre el medio natural,

ofreciendo valiosas lecciones sobre su abordaje en el presente y hacia el futuro, máxime si se tiene en cuenta que Jones (2003), indican que las principales condiciones del clima no han cambiado, de forma apreciable, en los últimos 1000 a 2000 años, lo cual hace que los elementos mencionados sean representativos de la variabilidad climática natural que podría esperarse durante el presente siglo, en ausencia de cualquier influencia humana.

El contenido de arcillas evidencia la presencia de más escorrentía, lo que mantiene un nivel freático rasante y una vegetación herbácea. Además, el color de las arcillas se relaciona con las condiciones de humedad y grado de inundación del sitio de sedimentación (Flórez et al., 2023b).

United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) (2024), citados por Flórez y Parra (2024a), proporciona datos críticos sobre el clima e indica cómo la serie de temperaturas récord se corresponde con una tendencia al calentamiento, a largo plazo, impulsada por la actividad humana, principalmente por emisiones de Gases con Efecto Invernadero (GEI). Esta tendencia se ha hecho evidente en las últimas cuatro décadas, y los últimos 10 años consecutivos han sido los más cálidos desde que comenzaron los registros de datos a finales del siglo XIX. Fenómenos como El Niño y La Niña, que alternativamente calientan y enfrián el océano Pacífico tropical, pueden contribuir con una pequeña variabilidad en las temperaturas globales de un año a otro. El fuerte episodio de El Niño que comenzó en la primavera boreal de 2023 contribuyó a avivar el calor extremo del verano y el otoño del año 2024. “El océano es la volante de inercia del clima” y “Dado que el océano cubre más de dos tercios de la Tierra, cualesquiera sean las temperaturas de la superficie del mar, el resto del planeta se verá afectado”. Los años de La Niña pueden contribuir a temporadas de huracanes más activas en el Atlántico. Esto se debe a que las condiciones de La Niña debilitan los vientos del oeste en la atmósfera cerca de las Américas, por encima del mar Caribe y el océano Atlántico tropical. La cizalladura del viento (los cambios abruptos en su velocidad y dirección) puede atajar los huracanes antes de que estos se desarrollen. La Niña suprime este freno con eficacia, permitiendo que las tormentas tropicales se formen e intensifiquen sin obstáculos, Flórez y Parra (2024a).

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2024), citados por Flórez y Parra (2024a), advirtió que en 2024 el país estaría dividido con tres eventos extremos encabezados por un rápido cambio del fenómeno de El Niño al de La Niña, que comenzó en julio y enfriará el océano Pacífico. El segundo será la fuerte temporada de ciclones tropicales que afectará a la costa Caribe. El tercer fenómeno meteorológico que incrementará la vulnerabilidad del país es una división entre zo-

nas de fuertes lluvias al sur del país y zonas de sequía, los departamentos de la Orinoquia y la Amazonía continuarán con déficit de precipitaciones mientras que el resto del país tendrá unos meses con fuertes lluvias.

Ulf Büntgen, et al. (2024), a partir de mediciones de densidad máxima de madera tardía (MXD) de 534 árboles vivos y restos de *Pinus uncinata* de ecosistemas no perturbados del límite superior del bosque en los Pirineos centrales españoles, descubrieron un calentamiento estival sin precedentes. A través de los anillos de los árboles detectaron anomalías de temperatura frías y cálidas: -3,4 ($\pm 1,4$) °C en 1258 y 2,6 ($\pm 2,2$) °C en 2017. Así mismo encontraron un enfriamiento estival abrupto de -1,5 ($\pm 1,0$) °C después de 20 grandes erupciones volcánicas ocurridas entre 1119 y 2020 AC. Los autores concluyeron que el verano más frío, reconstruido para 1258, siguió a la erupción de Samalas en la isla de Lombok, Indonesia, en 1257 d.C (después de Cristo). De igual forma hablan de otros dos veranos más fríos en 1714 y 1288 d.C. (-2,8 ($\pm 1,1$) °C y -2,8 ($\pm 1,5$) °C, respectivamente), no asociados a volcanismo. Indican que el verano más cálido, basado en indicadores indirectos en la región del Mediterráneo occidental, es el de 2017 d.C

Schorndorf (2024) a través de análisis espectrales revelan periodicidades consistentes con la variabilidad ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) y los ciclos solares, lo que indica que la energía solar fue tal que calentó enormemente el suelo.

Flórez et al. (2023a) estudiaron la estratigrafía de los sedimentos del pantano La Bramadora y detectaron la ocurrencia de eventos alternos de precipitación, escorrentía, lluvia normal o no lluvia: en el techo predominaron períodos alternos de precipitación bajo un clima cálido con altas temperaturas que permitieron el progreso de un pantano arbóreo y el desarrollo del suelo actual de 18 cm de espesor, un Typic Endoaqualfs (Soil Survey Staff, SSS, 2022). En la parte media, lluvias intensas en algunos períodos y moderadas en otros, mediadas por pequeños episodios más secos, propiciaron la acumulación de arcillas, de manera cíclica. Inmersos en este conjunto de arcillas hay algunos paleosuelos de pequeño espesor. En la base se encuentra un conjunto de paleosuelos terrestres, desarrollados sobre una llanura aluvial de régimen torrencial bajo clima cálido con evidencias de aridez.

La erosión hídrica del suelo según Flórez y Parra (2024a), responde, entre otras circunstancias, a la forma de llover: a su intensidad y duración, y se presenta gracias a la acción del agua en las formas: pluvial (lluvias) o de escorrentía (escurrimiento) que, en contacto con el suelo (las primeras con impacto y las segundas con fuerzas tractivas), vencen la resistencia de las partículas (fricción o cohesión) del suelo generándose el proceso de erosión. El impacto de las gotas de lluvia en el suelo desprovisto de vegeta-

ción y expuesto, ocasiona el desalojo y arrastre del suelo; lo compacta por lo que disminuye su permeabilidad e incrementa la escorrentía; reduce la capa de infiltración y destruye los poros y fisuras del suelo expuesto. Todo el material desprendido, incluido material vegetal y animal, es arrastrado hasta el pantano, en este caso.

Según Flórez et al. (2023b), las pérdidas de peso por ignición (LOI), definen los climas y los ambientes registrados en el pantano: 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 materia orgánica, menor erosión hídrica y mayor contenido arbóreo (expansión del bosque). Bajo esta condición, como lo indican Flórez et al (2023a), se da el desarrollo del suelo (paleosuelos), con abundante MO en diferentes estados de descomposición. 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, con aumento de la precipitación, mayor erosión hídrica, mayor desarrollo de herbazales. Bajo esta condición se favorece la acumulación de sedimentos finos, arcillas en este caso, depositados por decantación, bien seleccionados, enriquecidos o no con MO lábil, así como con minerales altamente meteorizados.

Kennett et al. (2022), indican que las influencias antropogénicas actuales y futuras amplificarán la severidad de los eventos extremos en el ciclo del agua y conducirán a sequías más intensas y prolongadas que las que impactaron la productividad agrícola en el pasado reciente. Advierten cómo las respuestas humanas a la sequía en la península de Yucatán, durante el siglo XV d.C., pudieron haber creado el conflicto civil y el fracaso institucional en Mayapán.

Estos autores revelan que las reconstrucciones climáticas de largo plazo fueron de una magnitud mayor que las experimentadas en los últimos 100 años, las cuales, en la Mesoamérica precolombina pudieron haber incluido migración, declive demográfico, cambios geográficos en los centros de poder político y guerras. Para ellos las influencias antropogénicas actuales y futuras amplificarán la severidad de los eventos extremos en el ciclo del agua y conducirán a sequías más intensas y prolongadas que las que impactaron la productividad agrícola en el pasado reciente. Advierten como las respuestas humanas a la sequía en la península de Yucatán durante el siglo XV d.C., pudieron haber creado el conflicto civil y el fracaso institucional en Mayapán.

Preiser (2022) muestra cómo la Anomalía Climática Medieval incluyó dos máximos solares entre 920 y 1020 AC y entre 1100 y 1200/1250 d.C., la reducción de la actividad solar (temperaturas promedio globales más frías) caracterizó el “Mínimo de Oort” (aprox. 1010 a 1080) y el “Mínimo de Wolf” (aprox. 1280

y 1345) marcó la transición de la Edad Media. Así mismo sostiene que la anomalía climática la “Pequeña Edad del Hielo” indica que las erupciones volcánicas pueden ocasionar diversas formas de fenómenos meteorológicos extremos a partir de las perturbaciones atmosféricas provocadas por ellas que podrían agravar los efectos de mínimos de actividad solar. Resalta, que la enorme erupción de 1257 (ahora atribuida al volcán Samalas, isla de Lombok, Indonesia) junto con el incipiente Mínimo Solar del Lobo, contribuyeron con la transición a la “Pequeña Edad del Hielo” de finales del siglo XIII.

Como aspecto importante, este autor resalta el trabajo de Gogou y sus colaboradores mostrando otra tendencia positiva de la Temperatura Superficial del Mar (TSM), identificada a partir de finales del siglo XI, mientras que el periodo desde 1250 a 1400 AC, d.C. se caracterizó por "condiciones similares a las áridas", con otra transición "hacia condiciones más húmedas" después de 1400 AC d.C. Datos más recientes del suroeste del Peloponeso, publicados por Katrantsiotis y sus coautores, confirman estos hallazgos, con condiciones más húmedas que acompañaron la transición a la Anomalía Climática Medieval en el sur de Grecia, con el período de 850 a 1050 reconstruido como relativamente húmedo; las décadas entre 1050 y 1150 AC d.C. fueron más áridas.

Lüning et al. (2019), trabajaron sobre la Anomalía Climática Medieval y presentan una síntesis de la paleotemperatura para América del Sur que abarca los últimos 1500 años basada en datos multiproxy de 76 sitios terrestres y marinos publicados. Las zonas de vegetación andina ascendieron ladera arriba, los glaciares retrocedieron, la productividad biológica en los lagos de gran altitud aumentó, la duración de la capa de hielo de la estación fría en los lagos andinos se acortó y los árboles produjeron anillos anuales más gruesos.

Un calentamiento similar ocurrió en los mares costeros, excepto en las zonas de surgencias, durante todo el año de Perú, el norte de Chile y Cabo Frío (Brasil), donde los procesos de surgencia se intensificaron debido a cambios en los vientos y las corrientes oceánicas. El calentamiento medioeval en América del Sur y el hemisferio Norte parece haber ocurrido de manera sincrónica, probablemente con intensidades comparables.

Mora (2019) asienta que entre 1877-1878 y 1783-1809, se registraron sequías severas en el altiplano cundiboyacense, que ocasionaron pérdida total de cosechas en tierras de resguardos, mortandad de ganado, carestía y escasez en los mercados y coincidió con una epidemia de viruela. De 1881 a 1882, Ernst Röthlisberger, citado por Flórez y Parra (2024a), en su recorrido por el bajo Magdalena, recuerda el escaso caudal del río que no permitía el avance de su embarcación, la temperatura era de 38°C y 39°C a la sombra.

Núñez y Verbist (2018) consideran que la ocurrencia de sequías en Colombia está estrechamente relacionada con episodios fuertes y muy fuertes del fenómeno El Niño que, en el país, representa la mayor señal de variabilidad climática interanual. Estos autores citados por Flórez y Parra (2024a), en su publicación “Atlas de sequías de América Latina y el Caribe”, describen cómo estas generan impactos sociales, económicos y ambientales severos, cuando se extienden en el tiempo, impactando significativamente la seguridad hídrica y el desarrollo. La sequía fue el evento que afectó a más personas, por desastres naturales, en todo el mundo a lo largo del siglo XX, y la vinculan directamente a la pobreza originada por las pérdidas globales de producción agrícola, a los efectos negativos en la salud humana, al incremento de la inequidad de género, al detrimento de la seguridad hídrica y a la reducción del potencial energético hidroeléctrico global y ha sido relacionada con el surgimiento de conflictos bélicos y rupturas de los estados de paz.

Romá (2015), citado por Flórez y Parra (2024a), sostiene que el suroeste y las planicies centrales de Estados Unidos podrían estar en camino a enfrentar súper sequías que no se han visto en más de 1000 años. Advierte que lugares como California ya están experimentando condiciones muy secas, aunque consideradas bastante suaves comparadas con las que se presentaron en algunos períodos durante los siglos XII y XIII. Reporta que estas mega sequías, ocurridas durante 1100 y 1200 (AC), persistieron durante 20, 30, 40, 50 años seguidos e indica que su causa pudo estar relacionada con dos factores: reducción de las precipitaciones y aumento de la evaporación, disparadas por las altas temperaturas, llevando a suelos más secos.

Europa Press | ELMUNDO.es | Madrid, (2010), citado por Flórez y Parra (2024a), con base en estudios de anillos anuales de 300 árboles asiáticos como *Cicuta milenaria nepalí*, encontraron que las grandes sequías jugaron un importante papel en la historia durante 700 años, por lo menos. Cuatro mega sequías en los últimos 1000 años asolaron a la especie humana. La reconstrucción cubre tres episodios climáticos claves en el último milenio: la parte final de la Anomalía Climática Medieval, la Pequeña Edad de Hielo y el periodo contemporáneo de cambio climático basado en el ser humano.

Es posible que el clima haya jugado un importante papel en la caída de la penúltima familia real China, la dinastía Ming, en 1644, posiblemente debido a una sequía descrita como la peor en cinco siglos, revelada en los anillos de los árboles y que duró tres años. El monzón volvió a fallar entre 1756 y 1768, un periodo que coincide con el colapso de los reinos de los actuales Vietnam, Tailandia y Birmania. La sequía enturbió las estructuras políticas hasta Siberia, y los anillos arbóreos indican también que el oeste de la India se vio gravemente afectado. Este evento no aparece

documentado en textos históricos, pero los investigadores rastrearon sus consecuencias en los anillos de varias tecas en Tailandia, y más tarde en varios cipreses vietnamitas. En el artículo se indica, además, que la sequía que asoló la India entre 1790 y 1796 se sintió a lo largo y ancho del globo y trajo consigo levantamientos civiles y tumultos y que la peor de todas fue la “Gran Sequía” de la era victoriana, entre 1876 y 1878, que afectó a los trópicos y provocó hambrunas que acabaron con la vida de 30 millones de personas.

García y Martínez (2009), citado por Flórez y Parra (2024a), en apoyo a la hipótesis de que la desaparición de la civilización Maya se debió a un periodo de sequía extremo, aportaron evidencia de un episodio seco entre 900 y 1310 AD y una “anomalía hidrológica” (1100-1220 AD), al parecer influenciado por la circulación atmosférica ligada al fenómeno ENSO. Estos autores concluyen que los episodios paleoclimáticos del Periodo Cálido Medieval y la Pequeña Edad de Hielo, aparentemente tuvieron repercusiones en el Neotrópico.

Fagan (2009, 2008), citado por Flórez y Parra (2024a), sostiene que en las zonas tropicales y subtropicales se produjeron sequías que llevaron al colapso de diversas civilizaciones. Indica que en el oeste de América del Norte y en estudios realizados en el lago Owen, se encontró que hubo una gran sequía entre los años 900 y 1250. Aunque en el 1100 se presentó un ciclo lluvioso que elevó la altura del lago en 19 metros, 150 años después se generó una sequía con una duración mayor a 100 años. La alternancia de lluvias intensas y sequías evidenciaban que el periodo cálido medieval se caracterizaba por las oscilaciones extremas. Para el oeste de América del Norte se han identificado cuatro períodos de sequía (935, 1304, 1150 y 1253), pero en el 1300 se originó un cambio abrupto que llevaría a 600 años de mayor humedad, a pesar de breves lapsos de sequía.

El autor anterior considera que varios factores causaron el advenimiento de lo que se conoce como la “época de las grandes sequías”: el calentamiento global a gran escala, el incremento del flujo ascendente de agua fría en el Pacífico oriental, la mayor actividad volcánica y la elevada actividad de las manchas solares. Para él, aunque el periodo cálido medieval se ha considerado un “misterio climatológico”, los estudios recientes han demostrado que El Niño fue el causante de las afectaciones del clima. Anota que, de acuerdo con los datos aportados por el estudio de los sedimentos de los océanos y los lagos, la selva tropical en la que habitaban los grupos mayas sufrió cuatro períodos de sequía (760, 820, 860 y 910) que coinciden, en cierta medida, con los que se produjeron en la región oeste de América del Norte. A pesar de que las ciudades mayas establecieron sistemas de gestión hídrica, tal como sucedió en Tikal, ellos resultaron inadecuados para soportar una sequía que se prolongó por varios años.

Pabón (2006), obtuvo para Colombia información sobre las primeras crónicas escritas por los españoles de los años 1524, 1542, 1560, en las que se relataban los fuertes eventos de precipitación en el mar Pacífico y en los ríos ubicados hacia el centro de Colombia que hacían imposible la navegación o el recorrido a pie. Boussingault (1849) registra, en los años 1822-1825, una sequía en Colombia en la cual hubo pérdida de cosechas, varias enfermedades, muerte de animales y abandono de aldeas. Plazas et al. (1993), afirman que el “Calentamiento medieval”, fue clave para el colapso de la cultura Zenú, el cual pudo ocurrir entre 1338-1324 d.C.

2.1 Localización del área. 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). Flórez et al. (2023a), se encuentra en la parte baja distal de una microcuenca coluvio-aluvial cerrada, desarrollada sobre rocas sedimentarias terciarias. La cuenca está sometida a un régimen pluvial de alta torrencialidad y altamente erosiva.

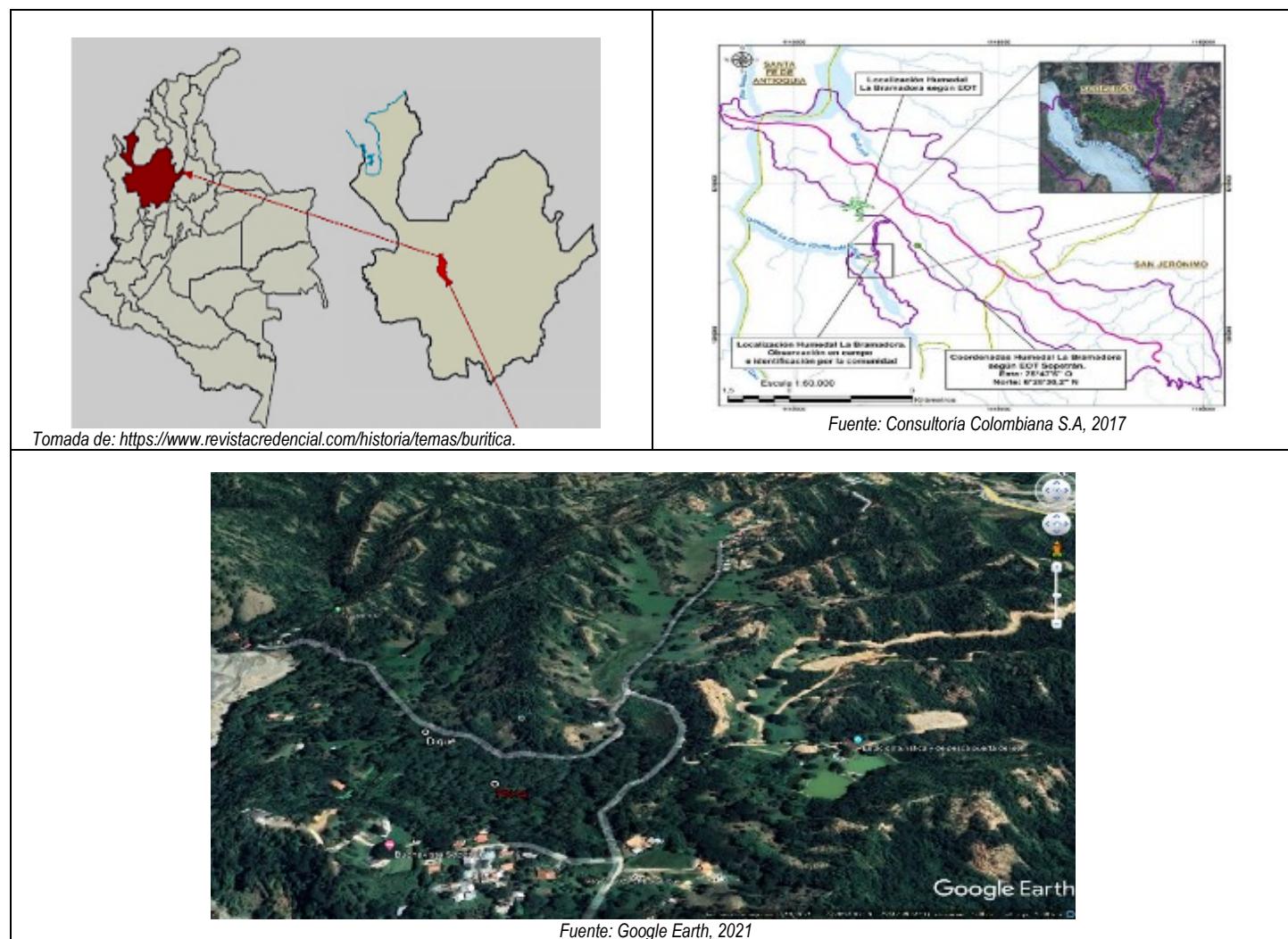


Figura 1. Localización del Pantano La Bramadora, Vereda La Puerta, Municipio de Sopetrán, Departamento de Antioquia, Colombia.

4. RESULTADOS

4.1. Paleoprecipitación registrada en los sedimentos lacustres del Pantano La Bramadora. El clima está dominado por la precipitación atmosférica y el pantano es mal drenado debido a la presencia del nivel freático en o cerca de la superficie del terreno. La posición del nivel freático controla la cobertura vegetal que se desarrolla en él: hierbas heliófilas, acuáticas y flotantes donde se presenta una lámina de agua sobre el suelo; hierbas y arbustos leñosos y árboles anfibios cuando el nivel freático está a ras del suelo y árboles anfibios, hierbas ombrófilas y arbustos leñosos cuando el nivel freático se encuentra a varios centímetros dentro del suelo.

El fenómeno erosivo más importante en esta cuenca es la erosión hídrica, pluvial y/o concentrada, que arranca y transporta las partículas de suelo por escorrimiento en laderas y taludes. Las rocas sedimentarias y sus saprolitos tienen una alta respuesta a esta erosión que crea geoformas erosivas y denuda las laderas dejando expuestos los materiales. La producción de sedimentos torrentiales gruesos se acumula en los piedemontes, mientras que los sedimentos medios y finos en las llanuras de inundación. Los sedimentos más finos, limos y arcillas, llegan a la propia cuenca de drenaje y finalmente al pantano (Figura 2). En la cuenca ha sido más determinante la forma como llueve (intensidad: suave y prolongada, fuerte y prolongada y aguaceros fuertes cortos/largos) que la cantidad de lluvia que cae en mm/h (Tabla 1).

La Tabla 1 muestra, de base a techo en el N14, la conformación de cuatro grupos de forma de lluvia, según la distribución del porcentaje de granos gruesos presente en cada centímetro de sedimento del núcleo mostrado en la Figura 3. A continuación, se describen dichos grupos, de base a techo.

En el primer grupo, entre 950 a 850 cm, correspondiente al periodo entre 1015 a 1450 AC, la lluvia suave y prolongada entre 950 a 931 cm, podría estar indicando un clima cálido con escasez de humedad en el suelo, lo que permitió la formación de un suelo bajo condiciones áridas, dada la existencia de anhidrita, la poca meteorización de los materiales y la formación de un bosque terrestre. Dada la falta de agua y las sequías prolongadas, contrastadas con episodios de lluvias esporádicas, pero muy intensas, se pasó a paleoclimas cálidos y más húmedos que, mediante procesos de translocación, dieron lugar al desarrollo de horizontes con acumulación de arcillas, sodio, sales, carbonato, yeso y sílice, favoreciéndose la salinización y la formación de anhidrita (Wilson

et al., 2013), generándose dos paleosuelos en la base que, de acuerdo con SSS (2022), se clasifican como **Ustic Haplogypsis** (inferior) y **Ustertic Haplocambids** (superior), estos podrían haberse formado dentro del Periodo Cálido Medioeval entre 1200 a 1450 AC. En el periodo comprendido entre 850 y 930 cm aumentan las lluvias y se hacen persistentes aguaceros fuertes (cortos o largos) que permitieron el desarrollo de otro paleosuelo, a partir del cual se empieza a formar el pantano propiamente dicho, donde dominan árboles anfibios y, de manera subordinada, arbustos leñosos y hierbas ombrófitas. El periodo entre 1347-1353 AC, localizado entre 870 a 882 cm, se considera como el periodo más frío de la historia.

El segundo grupo, entre 851 a 551 cm, correspondiente al periodo 1450 a 1600 AC, se caracteriza por dos periodos de lluvia fuerte y prolongada separados por uno de lluvia suave y prolongada, con algunos periodos secos cortos y aguaceros fuertes y cortos intercalados. Durante este periodo, entre 1482 y 1644 AC, se formaron dos suelos de poco espesor, separados por un estrato arcilloso, los cuales fueron nombrados como “paleosuelos mellizos”, que podrían coincidir con un periodo de sequía que afectó la cultura Zenú en Colombia y probablemente pueda relacionarse con el decaimiento de la cultura Maya en Centroamérica.

Para este periodo varios autores, citados por Flórez y Parra (2024b), reportan que, en 1450 termina la Anomalía Climática Medieval y en 1500 comienza la fase fría y seca conocida como la “Pequeña Edad de Hielo” (LIA), que se mantiene hasta 1720. En Colombia, en este periodo, se registraron importantes eventos de precipitación en el Pacífico y en la región andina que hicieron imposible la navegación o el recorrido a pie.

El tercer grupo, entre 550 y 250 cm, correspondiente al periodo entre 1600-1800 AC, comienza con un periodo de lluvia suave y prolongada, seguido por aguaceros fuertes (cortos o largos) y termina en un periodo de lluvia fuerte y prolongada. La presencia de amplios periodos de tiempos “secos” o de lluvias escasas, permitió el asomo de un “mejoramiento climático”. En cuanto a periodos secos, Flórez y Parra (2024a), resaltan los registrados en 1692, con una sequía con plaga de langosta; en 1622, 1619 y 1617, cuando hubo destrucción de cultivos, hambruna y enfermedades y en 1611, cuando se registró la “Insolación solar total” o “constante solar por aumento de manchas solares”. En 1644 se registró la sequía más grande de la historia que duró tres años y produjo la caída de la dinastía Ming.

CUENCA LA BRAMADORA (Bs-T)

1. Burbujas de calor; 2) Ecosistema (terrestre y lacustre) dominado por la precipitación (PPT); 3) PPT atmosférica variable maestra, 4) Nivel freático.



Figura 2. Unidades geomorfológicas en la cuenca La Bramadora, Sopetrán, Antioquia. De izquierda a derecha colinas desarrolladas a partir de sedimentos terciarios; depósitos torrenciales, piedemontes, áreas más amplias con depósitos mal seleccionados de llanuras de inundación y pequeños vallecitos que se unen unos con otros conformando una llanura amplia, colonizada por gramíneas, juncales, ciperáceas y algunos árboles y arbustos. Estas llanuras colindan con el pantano donde se desarrolla diversas asociaciones vegetales dependiendo de la lámina de agua.

Tabla 1. Forma en que llovía en la cuenca La Bramadora, Vereda la Puerta, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

EDAD (AC) De base a techo	PROFUNDIDAD (cm)	CÓMO LLOVÍA		
		Lluvia suave prolongada	Lluvia fuerte prolongada	Aguaceros fuertes cortos/largos
1800-2022 AC	0-52			
	53-139			
	140-250			
1600-1800 AC	251-345			
	346-430			
	431-550			
1450-1600 AC	551-620			
	621-660			
	661-851			
1015-1450 AC	850-930			
	931-950			

El cuarto grupo, entre 250 y 1 cm, correspondiente al periodo entre 1800 y 2022 AC, comienza con un periodo de aguaceros fuertes (cortos o largos), seguido de una lluvia fuerte y prolongada, para terminar con una lluvia suave y prolongada. Este descenso de lluvia, hasta el presente, plantea un mejoramiento climático. En 1850, se registra invierno en todo el mundo.

Para este cuarto grupo existe información de datos meteorológicos tomados con instrumentos para los periodos entre 2022-1998, 1997-1951 y 1914-1986 que, aunque no tienen la misma frecuencia ni precisión, dan cuenta de la precipitación y su relación con fenómenos Niño y/o Niña para Colombia. Con los datos tomados a partir de tres estaciones meteorológicas en Cartagena, Bogotá y Medellín, Benavides y Rocha (2012), citados por Flórez y Parra (2024a), establecieron algunos comportamientos climáticos extremos en Colombia durante estos períodos de registro como:

En cuanto a la precipitación, citado por Flórez y Parra (2024a), el año más lluvioso en los últimos 42 años fue 2010, con una lluvia de 178,5 mm. Los meses más lluviosos desde 1970, en el país, fueron enero de 2010 (37,2 mm), febrero de 2007 (40,5 mm) y enero de 1977 (38,8 mm).

Para la temperatura, se registró 1998 como el año más cálido con 22,85°C. Los años más fríos fueron 1996, 1999, 2000, 2008 y 2010. En 1783, 1809, 1822 y 1825 se presentaron sequías severas.

En la Figura 3, se puede ver la forma de llover y como se va sedimentando lo que se mueve por escorrentía; por ejemplo, aguaceros fuertes, prolongados o no, se reflejan en sedimentos de colores oscuros, mostrando que no solo se mueven materiales litológicos sino también abundante materia orgánica. Por el con-

trario, lluvias suaves prolongadas o no, se corresponden con sedimentos más claros. En esta figura también se relacionan algunos eventos de precipitación y sequía, registrados a nivel global, como los que hubo entre 1347-1353, periodo más frío de la historia, o entre 1482-1644 que marca la presencia de una sequía muy fuerte que diezmó culturas como la de Los Mayas en México y la de los Zenúes en Colombia.

Después de 1611, se comienza con la instrumentación meteorológica y se empiezan a guardar registros que permiten, en la actualidad, comprender mejor ese clima cambiante, en especial en el trópico. Eventos Niño y Niña ya empiezan a ser detectados con precisión y ello permite que la agricultura, la navegación y muchas actividades humanas puedan ser planeadas o, por lo menos, documentadas.

En la Figura 4 se destaca la existencia de paleosuelos intercalados con espesas capas de arcillas bandeadas y/o laminadas, así como un banco de turba y el suelo actual hacia el techo. Sobresalen, en la parte media, dos paleosuelos nombrados “mellizos”, y en la base, tres paleosuelos, dos de ellos desarrollados bajo condiciones de aridez.

De la Figura 4, la presencia de los paleosuelos en la base del núcleo N14 (916-950 cm) podría relacionarse con el Calentamiento Medioeval, reportado a nivel global entre 1200-1450 AC, y dentro del cual se enmarca la actividad de varios volcanes (Samalas en Indonesia en 1257, Kuwea en Japón en 1452 y Bardarbunga en Islandia en 1477), que pudieron haber influido en el aumento de la temperatura en el trópico, lo que pudo ocasionar el declive de las civilizaciones Maya y Zenú en América, dada una gran sequía que originó presiones por el agua. Suprayaciendo estos paleosuelos, y dentro de este mismo rango de tiempo, otro

paleosuelo, ubicado entre 870-882 cm, con un desarrollo incipiente, revela un mejoramiento en las condiciones climáticas. Hacia la parte media del núcleo, dos paleosuelos “mellizos” (623-636 cm), inmersos en espesos estratos arcillosos, denotan cambios ambientales favorables en este ecosistema.

En cuanto a las arcillas, sus colores son indicativos del contenido de agua, de la vegetación herbal y del enriquecimiento en materia orgánica que le imprime una coloración particular a cada estrato, todos con tonalidades que varían entre grisáceas, verdes, azuladas y chocolate. La presencia de arbustos y vegetación anfibia, confirman los cambios ambientales que se han dado en el pantano a través del tiempo.

Nótese en la Figura 4 como los componentes orgánicos (color verde, gráfico continuo a la lito-pedoestratigrafía), reflejan bien la presencia de los paleosuelos y las turbas en el techo del núcleo N14 en la base y a través de este. Los valores del componente orgánico aumentan donde hay paleosuelos, por lo que son perfectos marcadores de estos, del mismo modo que lo son los grumos (pirita framboidal, color negro) y el carbón (astillas de carbón, color café). Donde hay estratos arcillosos los componentes orgánicos disminuyen o no hay.

Con todos los elementos expuestos en la Figura 4, se definen tres ambientes preservados en el núcleo N14, por lo menos, durante los últimos mil años; estos son:

- 1) Ambiente con déficit de precipitación que permitió la dominancia de árboles anfibios; subordinados arbustos leñosos y hierbas ombrófilas, con acumulación de materia orgánica alta.
- 2) Ambiente con exceso de precipitación que permitió la dominancia de hierbas heliófilas, acuáticas y flotantes, donde la acumulación de materia orgánica es baja.
- 3) Ambiente con lámina de agua fluctuante que permitió la dominancia hierbas heliófilas, arbustos leñosos y árboles anfibios y donde la acumulación de materia orgánica tiene un nivel medio.

4.2 Paleosuelos. Donde se observan paleosuelos se registra un mejoramiento climático, o períodos de sequía. En el núcleo N14 existen paleosuelos, algunos de ellos, de escaso espesor, pero con rasgos de pedogénesis reconocibles (estructura, color, materia orgánica en avanzado estado de alteración); de estos paleosuelos solo se describen cuatro por las siguientes razones:

- 1) grado de desarrollo pedogenético que incluye horizontación;
- 2) su ubicación dentro del núcleo, y
- 3) porque solo se podían realizar tres dataciones, lo cual llevó a que se eligieran los paleosuelos que tuvieran una característica especial, una de ellas la presencia de minerales como la anhidrita. Con base en estos criterios se seleccionaron los paleosuelos comprendidos entre 916-950 cm, 870 y 882 cm y 623 y 636 cm; ade-

más, se describe el suelo actual entre 1-18 cm y las turbas localizadas entre 19-144 cm.

Entre 916-950 cm se evidenciaron dos paleosuelos formados bajo regímenes de humedad arídico que permitieron la formación de Aridisoles, de ellos, el superior con más lluvia que el inferior. El paleosuelo que se encuentra entre 870-882 cm muestra un mejoramiento climático, no recibió tanta lluvia, pero tuvo limitaciones en su evolución, algunos períodos de lluvia dejaron grietas que le transmitieron una condición particular en la cual la diferenciación entre horizontes fue débil. Los paleosuelos mellizos evolucionaron bajo una condición de lluvias fuertes y prolongadas, en regímenes de humedad údico y acuático, el inferior con un drenaje más imperfecto que el superior. Hacia el techo, entre 19-150 cm, se acumularon turbas que indican poca humedad en el sistema, lo que se refiere directamente a lluvia suave y prolongada que arrastraron hasta el pantano mucha mayor cantidad de materia orgánica, especialmente hojarasca y sedimentos inorgánicos. En el techo, la formación del suelo actual refleja un ligero cambio en el clima mediado por la presencia de lluvias suaves y prolongadas.

A continuación, se hace la descripción de los paleosuelos seleccionados, advirtiendo que parte de los valores de contenidos de diferentes elementos y otras propiedades que se presentan son tomados de Flórez et al. (2023b)

4.2.1. Paleosuelo comprendido entre 934 a 950 cm. Tiene dos horizontes: Ab-Bwb, (Figura 5) y su descripción es la siguiente:

Horizonte Ab: 934-942 cm; color 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro; textura Areo arcilloso (AAr); estructura en bloques subangulares, finos, moderados. Ligeramente laminado con un cambio de color muy débil. Límite superior abrupto, marcado por la presencia de una criptotefra, el inferior gradual. pH 8.0. Materia orgánica altamente descompuesta, constituida esencialmente por fitolitos, tejidos fúngicos, animales y vegetales, polen, esporas, semillas, fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal, y coágulos. El promedio de las perdidas por ignición (LOI) fue de 22.11%. Los porcentajes de Mg son bajos, mientras que los de Ca y K son altos, mayor el K que el Ca. El Al es muy regular y con valores muy bajos respecto al Si, Zn, Ni, Mn y Fe. En 938 cm aumentan las concentraciones de todos los elementos y en 939 cm disminuyen..

Paleosuelos marcadores de períodos de aridez en el último milenio conservados en el Pantano la Bramadora, Sopetran, Colombia.

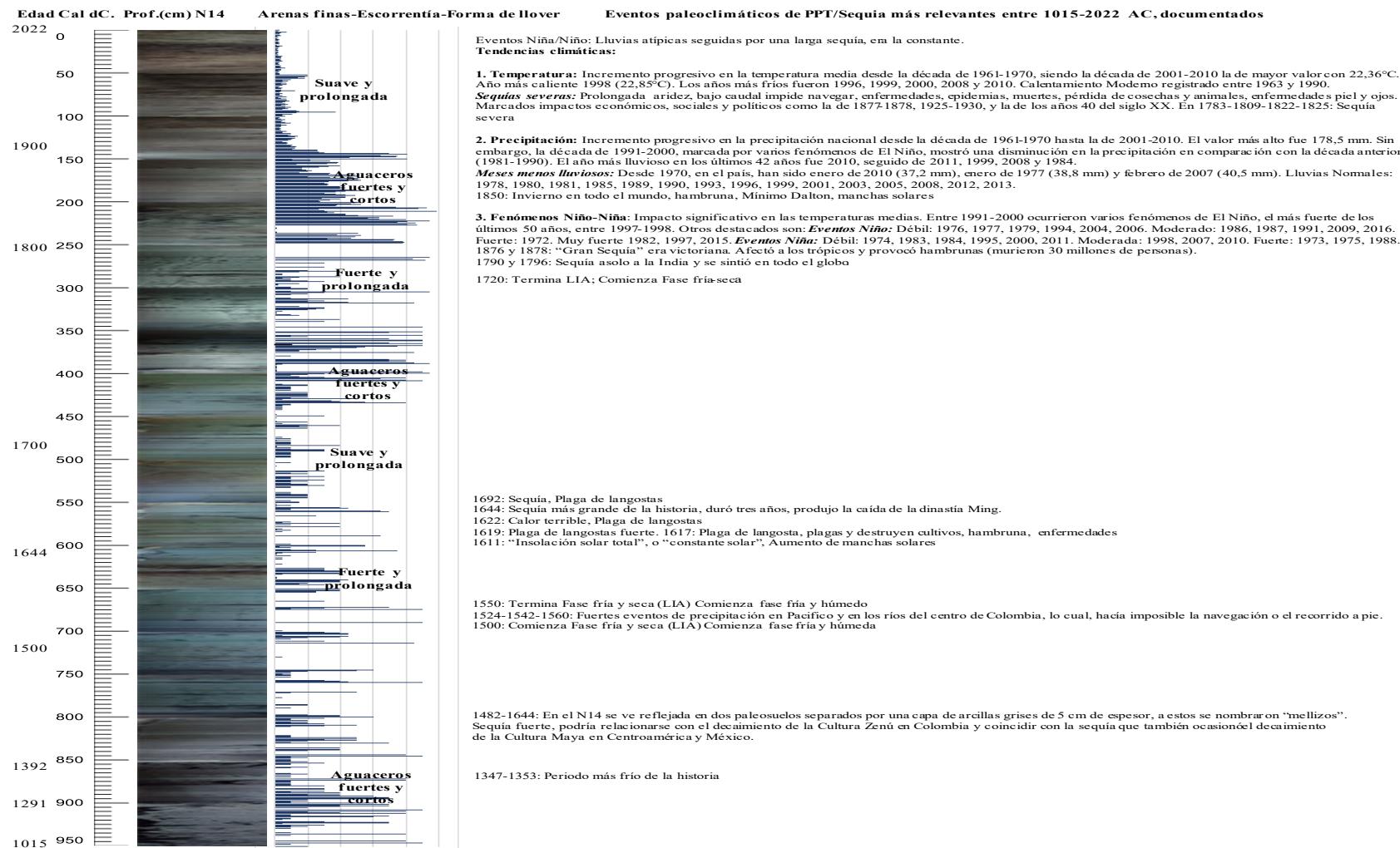


Figura 3. La litoestratigrafía del núcleo N14, muestra la diversidad de materiales sedimentados, en el último milenio; al lado derecho de la gráfica se relacionan eventos paleoclimáticos reportados por otros autores y que pueden evidenciarse en los sedimentos lacustres del pantano localizado en Sopetrán, Antioquia, Colombia.

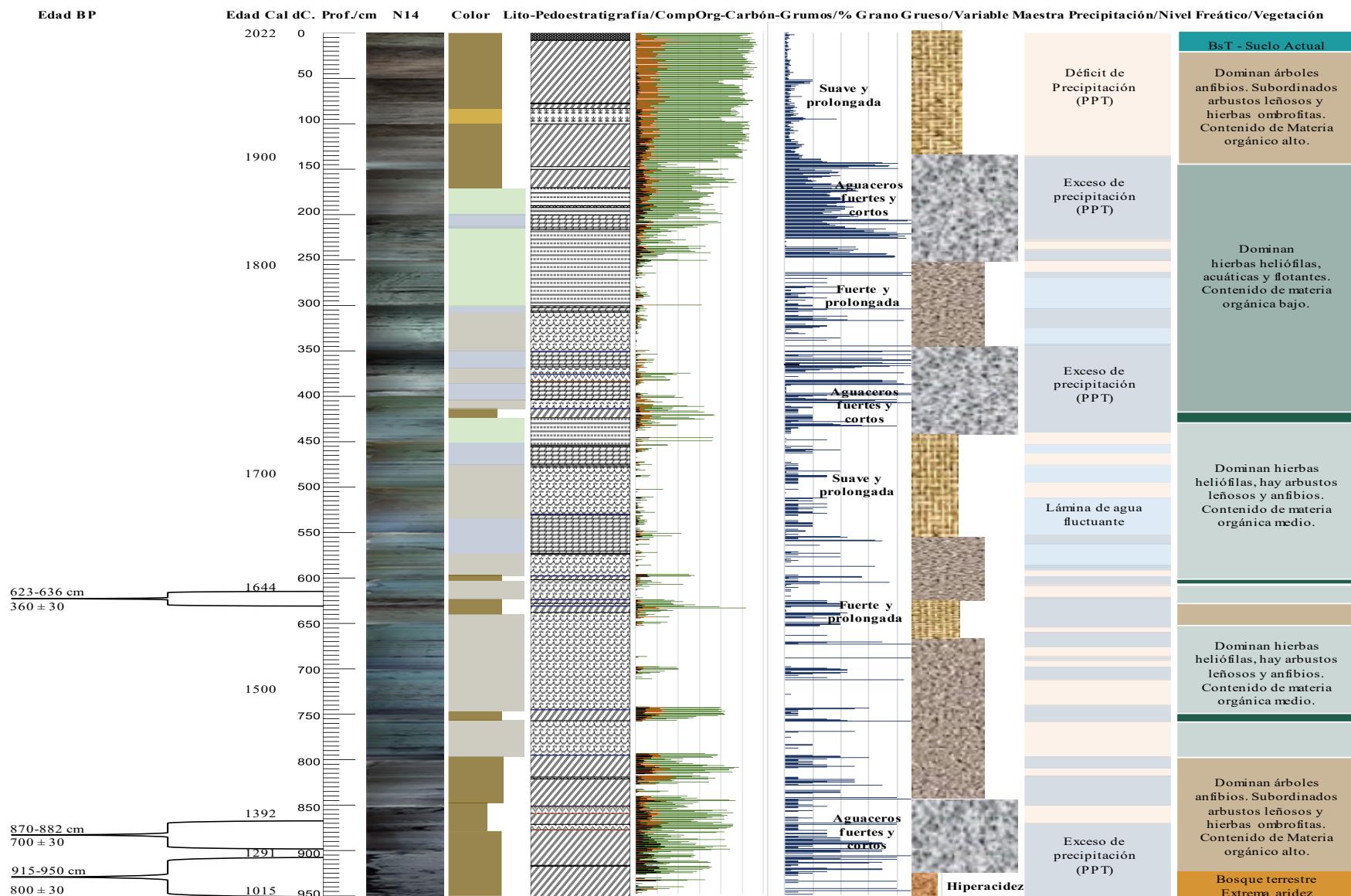
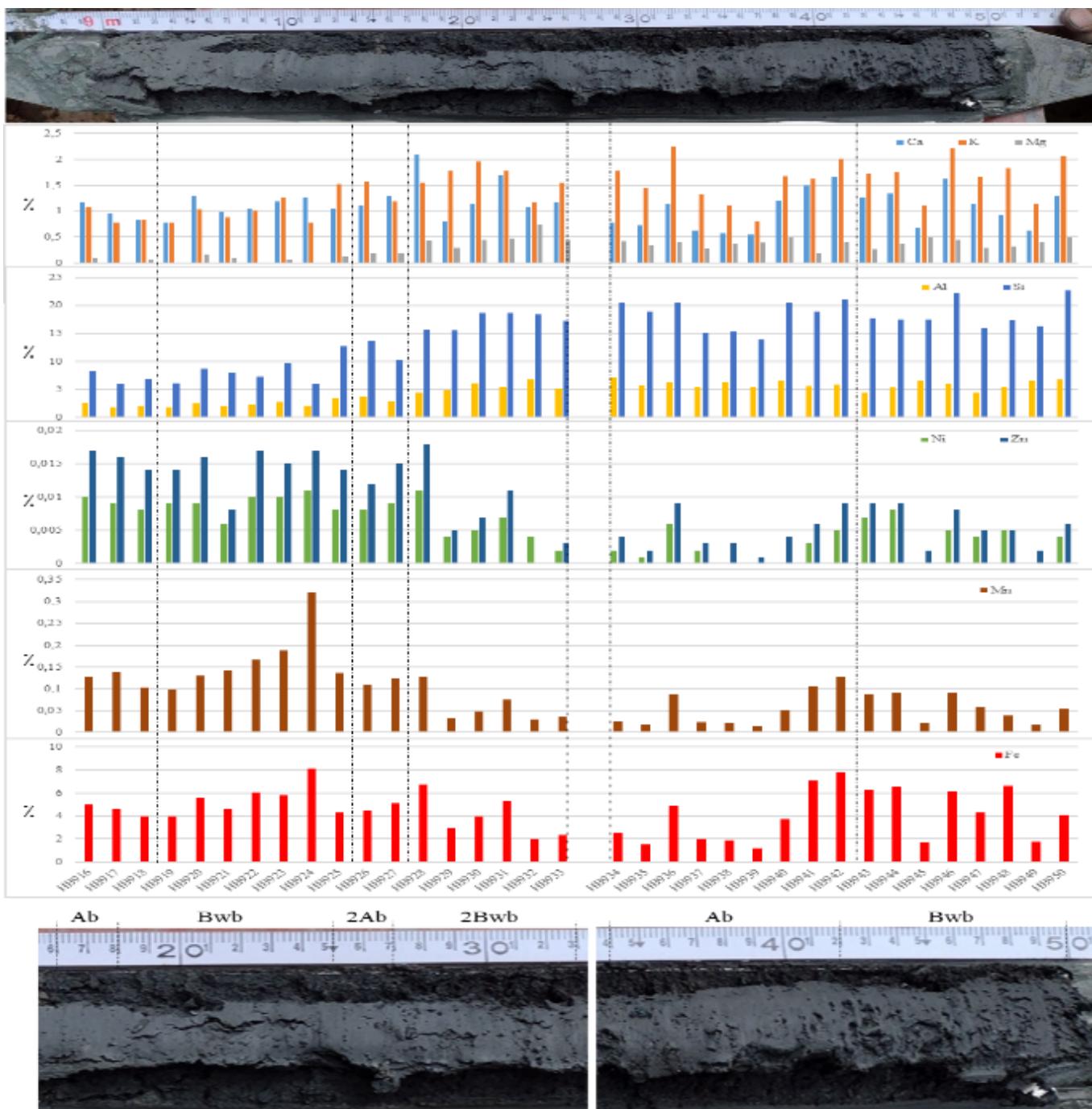


Figura. 4. De izquierda a derecha, se expresa la evolución del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

Se indican los sitios donde se realizaron las tres dataciones y su reporte, se continúa con la sedimentación, su color, la lito y pedoestratigrafía, la relación de los microcomponentes orgánicos, la forma como llueve, el clima, la fluctuación de la lámina de agua y su relación con la precipitación, por último, la presencia de la vegetación como resultados de la interacción de todos los elementos considerados.



**Aquertic Eutrudepts (Paleosuelo Superior).
Ustertic Haplocambids (Paleosuelo Inferior).
De acuerdo con SSS (2022).**

Ustertic Haplogypsys Aquertic
De acuerdo con SSS (2022).

Figura. 5. Paleosuelos localizada entre 916 y 933, secuencia poligenética separada por una criptotetra del paleosuelo entre 934 y 950 cm. Todos ellos presentan anhidrita y fueron analizados del núcleo N14, extraído del Pantano la Bramadura, Sopetrán, Antioquia. En el N14 se analizaron por fluorescencia de rayos X (FRX) todos los elementos, sin embargo, para el propósito de este artículo solo se consideraron el Calcio (Ca), Potasio (K), Magnesio (Mg), Silicio (Si), Cinc (Zn), Níquel (Ni), Manganeso (Mn), y Hierro (Fe).

Horizonte Bwb: 942-950 cm; color 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro; textura Arenoso limosa (AL), estructura en bloques subangulares finos, medios. Límite superior gradual, el inferior abrupto marcado por la presencia de un horizonte de arena

gruesa en la base. pH 8.5. Materia orgánica aún reconocible, se observan tejidos fúngicos y vegetales, polen, esporas, fragmentos de carbón, agregados de pirita frambooidal y coágulos. El LOI fue de 12.18%. Desde el punto de vista mineralógico la mayoría

de los minerales son extremadamente finos (100% finos), casi todos translúcidos; hay cristales de augita, epidota, circón y mucha anhidrita. Los porcentajes de Mg, K, Ca, Al y Si aumentan, mientras que los de Zn, Ni, Mn y Fe disminuyen ligeramente, con respecto al horizonte anterior. En 945 y 948 cm se registra una caída en la concentración de todos los iones y en 948 y 950 cm una subida de las concentraciones de estos elementos.

Este paleosuelo fue clasificado como **Ustic Haplogypsids** de acuerdo con SSS (2022); pudo haberse formado, bajo un régimen de humedad arídico a ústico, y en años normales, están secos en todas partes de la sección de control de humedad durante menos de tres cuartos del tiempo (acumulado) cuando la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm debajo de la superficie del suelo es de 5°C o más o con bajas precipitaciones, o paleoclimas más húmedos por eventos de precipitación extrema ocasional que permiten la iluvia y la formación de arcillas, sales, carbonatos, sodio, yeso, anhidrita y sílice. Tiene un epipedón ócrico y un endopedón anhidrítico; desarrollado en un relieve plano, inundable, a partir de sedimentos fluvio-lacustre y aluviales. Vegetación natural herbácea con árboles.

4.2.2. Paleosuelo comprendido entre 916 y 934 cm.

Este paleosuelo presenta una secuencia poligenética (Figura 5). Para ellos se reporta una edad de 700 ± 30 BP. (1220 – 1291 cal AD). Las características son las siguientes:

4.2.2.1. Paleosuelo Superior

Horizonte Ab: 916-918 cm; color 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro; textura arcillosa (Ar); estructura migajosa. Sutilmente laminado, grietas largas. Límites transicionales. pH 8.5. Materia orgánica altamente descompuesta, constituida esencialmente por fitolitos, tejidos fúngicos, animales y vegetales, polen, esporas, semillas, abundantes fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal y coágulos. El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de 36.93%. Desde el punto de vista mineralógico la mayoría de los minerales son extremadamente finos (10% gruesos y 90% finos), casi todos translúcidos: hay cristales de augita, circón y anhidrita. La composición mineralógica de los suelos es similar a la de los materiales parentales. Los porcentajes de Mg son muy bajos en todo el horizonte mientras que K y Ca son ligeramente más altos y están acoplados; igualmente son bajos Al, Si, Ni, Zn y Mn y ligeramente es más alto el Fe. En 918 cm todos decrecen en su concentración, pero Al y Si se sostienen.

Horizonte Bwb: 918-925 cm; color 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro; textura arcillo arenosa (ArA); estructura en bloques subangulares finos, moderados. Límites transicionales. pH 8.5. Materia orgánica altamente descompuesta, constituida esencialmente por fitolitos rosados con núcleos oscuros, diatomeas, polen, esporas, tejidos fúngicos, animales y vegetales, abundantes

fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal y coágulos.

El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de 39.64%. Desde el punto de vista mineralógico los minerales son extremadamente finos (100% finos), casi todos translúcidos en el techo, pero, en el resto del horizonte, la proporción de finos y gruesos cambia (70% gruesos y 30% finos). Hay cristales de augita, epidota, circón y anhidrita.

Los porcentajes de Mg son muy bajos en todo el horizonte mientras que K y Ca son ligeramente más altos y están acoplados; igualmente son bajos Al, Si, Ni, Zn y Mn, ligeramente es más alto el Fe. En 921 cm se registra una caída fuerte en la concentración de Zn y Ni y en 924 cm bajan K y Si y suben Fe, Mn, Zn y Ni y un poco el Ca.

Este paleosuelo fue clasificado como **Aquertic Eutrudepts** de acuerdo con SSS (2022), ya que pudo haberse formado bajo un régimen de humedad údico, en clima cálido húmedo, con grietas. Tiene un epipedón ócrico y un endopedón anhidrítico; se desarrolló en un relieve plano, inundable, a partir de sedimentos lacustres, moderadamente profundos a superficiales con vegetación natural herbácea con árboles como ceibas y matarratón, entre otros; tiene drenaje imperfecto, limitado por un horizonte subsuperficial poco permeable. En estos suelos el proceso formador más importante en la evolución es la hoploidización, lo cual dificulta la diferenciación de los horizontes.

4.2.2.2. Paleosuelo Inferior.

Horizonte 2Ab: 925-927 cm; color 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro; textura Arcillosa (Ar); estructura migajosa. Ligeramente laminado, grietas largas. Límites graduales. pH 8.0. Materia orgánica altamente descompuesta, constituida esencialmente por fitolitos, tejidos fúngicos, animales y vegetales, polen, esporas, semillas, abundantes fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal y coágulos. El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de 25%.

Desde el punto de vista mineralógico se observan cristales de augita, circón y anhidrita. Los porcentajes de Mg, K, Ca, Al y Si aumentan, mientras que las de Zn, Ni, Mn y Fe bajan ligeramente con respecto al suelo suprayacente.

Horizonte 2Bwb: 927-934 cm; 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro; textura arcillo arenosa (ArA); estructura en bloques subangulares débiles, medios. Límite superior gradual, el inferior abrupto marcado por la presencia de una criptotetra. pH 6.0. Materia orgánica aún reconocible, se observan fitolitos, diatomeas, tejidos fúngicos, animales y vegetales, polen, esporas, semillas, muchos de estos carbonizados; hay fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal y coágulos. El LOI fue de 25.88%. Contiene cristales de augita, circón y anhidrita. Los porcentajes

de Mg, K, Ca, Al y Si aumentan, mientras que ligeramente bajan los de Zn, Ni, Mn y Fe. En 928 y 931 cm se registra un aumento en la concentración de todos los iones y en 929 y 932 cm una disminución de las concentraciones de ellos.

Este paleosuelo fue clasificado como **Ustertic Haplocambids** de acuerdo con SSS (2022); pudo haberse formado bajo un régimen de humedad del suelo que roza el arídico y en la sección de control de humedad que, en años normales, está seca en todas partes durante menos de tres cuartos del tiempo (acumulativo) cuando la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm debajo del suelo superficie es de 5°C o superior. Presenta grietas. Tiene un epipedón ócrico y un endopedón anhidrítico; desarrollado en un relieve plano, inundable, a partir de sedimentos lacustres, moderadamente profundos a superficiales, drenaje imperfecto, limitado por un horizonte subsuperficial poco permeable. Vegetación natural herbácea con árboles como ceibas y matorralón, entre otros. En estos suelos el proceso formador más importante en la evolución es la hoploidización, lo cual dificulta la diferenciación de los horizontes.

4.2.3. Paleosuelo comprendido entre 870 y 882 cm.

Este paleosuelo está conformado por un set de tres horizontes: Agb-Bwgb-BCgb (Figura 6). Para ellos se reporta una edad de 800 ± 30 BP. (1340 – 1392 cal AD).

Las características son las siguientes:

Horizonte Agb: 870-874 cm; color 2.5YR2.2/2 rojo muy oscuro, textura arcillo limosa (ArL), estructura en bloques subangulares, débiles, medios. Grietas largas y transversales formando cuñas; se observa cierta laminación con un cambio de color muy débil. Límites abruptos. pH 4.5. Materia orgánica altamente descompuesta, se oxida al contacto con la luz, constituida esencialmente por fitolitos carbonizados, tejidos fúngicos, animales y vegetales, polen, esporas, semillas, fragmentos de carbón, abundantes agregados de pirita framboidal. Hacia la base aumenta notablemente la materia orgánica y la presencia de agregados de pirita framboidal. El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de 36.07%. Los porcentajes de Ca y K tienen concentraciones de hasta 1.5%, siendo más altas las de K que las de Ca, excepto en 871 cm donde el Ca aumenta, al igual que todos los elementos considerados para este análisis; el Mg, al igual que Zn, Ni y Mn presentan valores muy bajos: menores al 1%, mientras que Fe y Al varían su concentración entre 4 y 10%. El Si es el elemento que presenta la mayor concentración.

Horizonte Bwgb: 874-877 cm; color entre 2.5YR2.2/2 rojo muy oscuro; textura Arcillo Limosa (ArL); estructura en bloques subangulares, fuertes, medios. Grietas formando cuñas. pH 4.5. Límites abruptos. Materia orgánica aún reconocible; se

observan fitolitos, diatomeas, tejidos fúngicos, animales y vegetales, polen, esporas, semillas, fragmentos de carbón, muchos tejidos carbonizados, agregados de pirita framboidal. El LOI fue de 40.4%. Los porcentajes de todos los elementos medidos siguen un comportamiento muy similar al descrito para el horizonte anterior pero las cantidades son menores. En 875 cm baja la concentración de todos o se mantienen, excepto la del Si, que aumenta.

Horizonte BCgb: 877-882 cm; laminado, láminas que se diferencian por el color entre 2.5YR2.2/2 rojo muy oscuro y 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro, estas últimas predominan. Textura Arcillosa (Ar); estructura laminar. Límite superior abrupto e irregular y el inferior gradual. pH 4.0. Materia orgánica altamente descompuesta, muy translúcida; se observan fitolitos, diatomeas, tejidos fúngicos, animales y vegetales, polen, esporas, semillas, muchos de estos carbonizados, hay fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal y coágulos. El LOI fue de 36.55%. En este horizonte se resalta la presencia de caolinita, montmorillonita y agregados de pirita framboidal como minerales de neoformación. Los porcentajes de todos los elementos medidos siguen un comportamiento muy similar al descrito para el horizonte anterior pero las cantidades son menores; en 877 cm, todos decaen excepto Ni y Zn que aumentan un poco su concentración; al final, en 882 cm estos dos mismos elementos, al igual que Mn y Fe, disminuyen.

Este paleosuelo fue clasificado como **Torrertic Dystrus-tepts**, de acuerdo con SSS (2022); pudo haberse formado bajo un régimen de humedad arídico a ústico, régimen de temperatura isotérmico, con grietas; tiene un epipedón ócrico y un endopedón sómbrico; desarrollado en un relieve plano, inundable, a partir de sedimentos lacustres, moderadamente profundos, drenaje imperfecto y vegetación natural herbácea

4.2.4. Paleosuelo comprendido entre 623-636 cm.

En esta posición se encuentran los paleosuelos que se han identificado como Paleosuelos Mellizos (Figura 7). Están conformados por una secuencia poligenética de dos paleosuelos, el superior entre 623-630 cm y el inferior entre 630-636 cm. Para ellos se reporta una edad de 360 ± 30 BP. (1482–1644 cal AD), sus características son las siguientes:

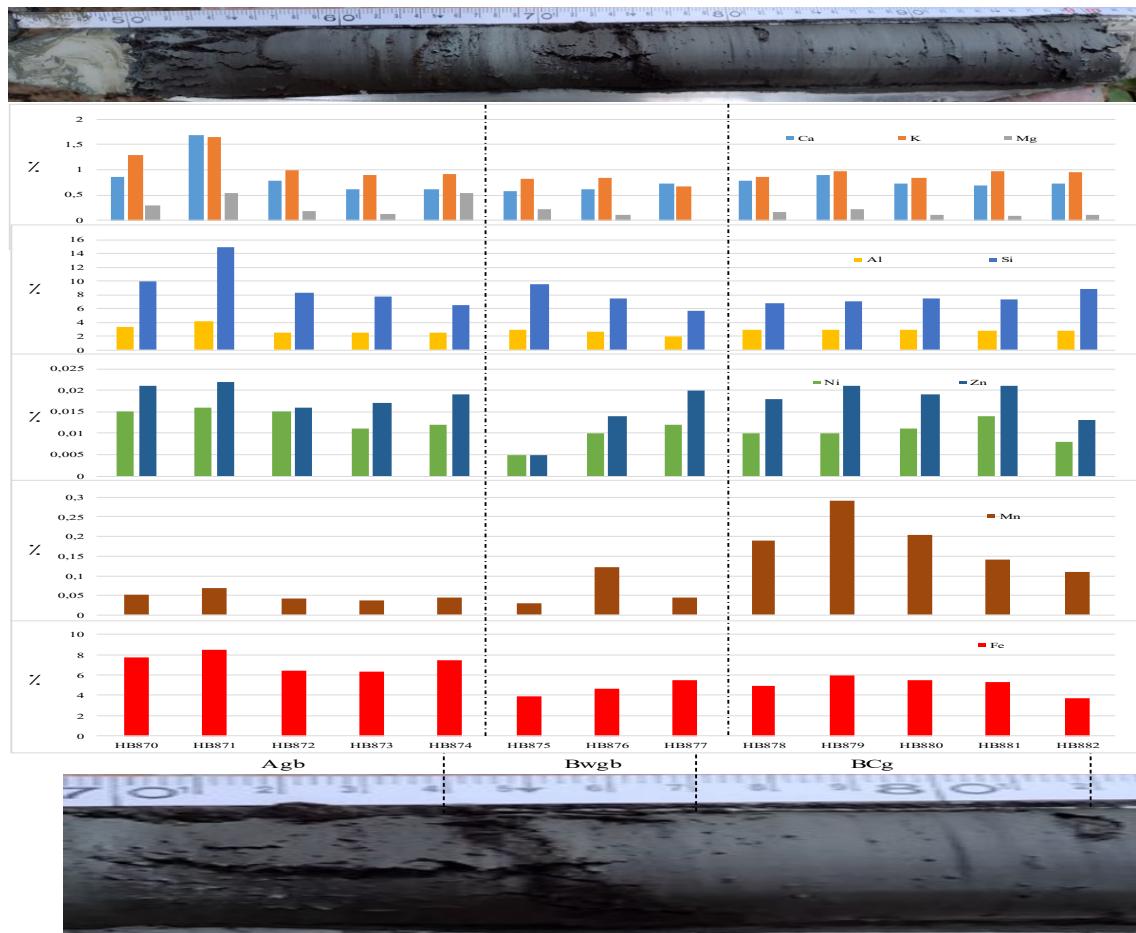
4.2.4.1. Paleosuelo Superior (entre 623 y 630 cm).

Horizonte Ab: 623-625 cm; color 2.5YR3/2, rojo oscuro, textura Arcillo Limosa (ArL), estructura en bloques subangulares, finos, moderados. Límite superior abrupto, definido por un cambio de color, e inferior gradual. Materia orgánica aún reconocible, altamente descompuesta y oxidada; se observan fitolitos, diatomeas, tejidos fúngicos y vegetales, esporas, semillas, fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal y coágulos. pH 6.5. El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de

20,36%. Este horizonte presenta agrietamiento vertical fuerte. Los porcentajes de Mg y K tienen un comportamiento muy similar de menos de 2% siendo ligeramente mayor el Mg, mientras que el contenido de Ca es mayor y variable entre 3 y 5%. El Al y el Si presentan valores relativamente altos que varían entre 5 y 20% siendo el Si el que tiene los más altos porcentajes. Ni y Zn se presentan en centésimas, el Mn en decimas mientras que para el Fe sus valores fluctúan entre 8 y 10%.

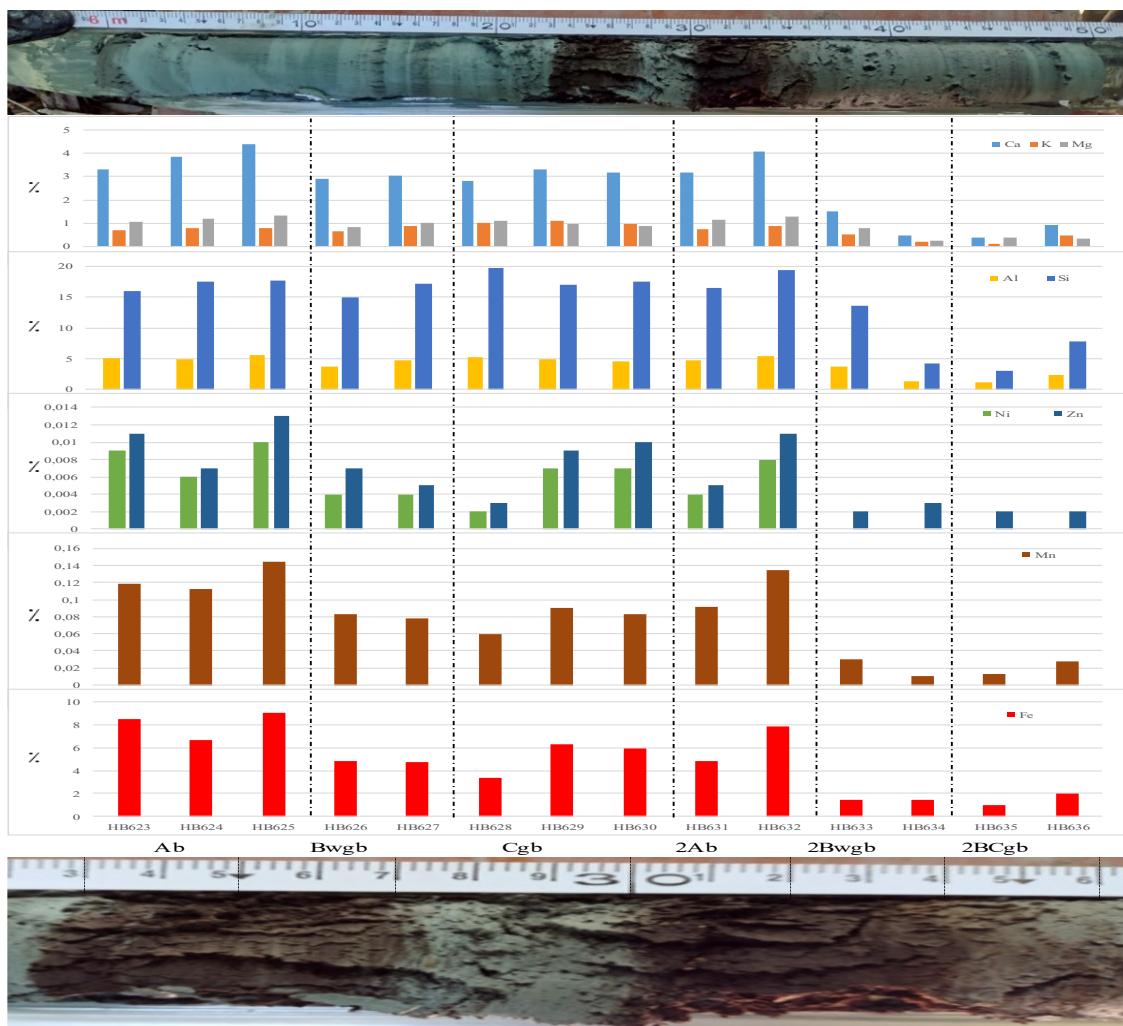
Horizonte Bwgb: 625-627 cm; color 2.5YR3/2, rojo oscuro, textura Arcillo Limosa (ArL); estructura en bloques subangulares, finos, moderados, micro bandeados, bandas oscuras y claras, las oscuras le dan el color al horizonte, las claras de menor espesor (1 mm). Límite superior gradual, inferior abrupto, definido

por un cambio de color. Materia orgánica aún reconocible, altamente descompuesta y oxidada; se observan fitolitos, diatomeas, tejidos fúngicos y vegetales, esporas, semillas, fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal y coágulos. pH 6.5. El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de 28,78%. Este horizonte presenta agrietamiento vertical fuerte. Los porcentajes de Mg y K tienen un comportamiento muy similar de menos de 2% siendo ligeramente mayor el Mg, mientras que el contenido de Ca es mayor y variable entre 3 y 5%, en 626 cm todos bajan. El Al y el Si presentan valores relativamente altos que varían entre 5 y 20% siendo el Si el que tiene los más altos porcentajes. Ni y Zn se presentan en centésimas y son ligeramente más altos que en el horizonte anterior. En 626 cm Ni, Zn, Mn, Fe aumentan y las bases disminuyen significativamente.



Torrertic Dystrustepts, de acuerdo con SSS (2022)

Figura. 6. Paleosuelo localizado entre 870 y 882 cm del núcleo N14, extraído del Pantano la Bramadora, Sopetrán, Antioquia. En el N14 se analizaron por fluorescencia de rayos X (FRX) todos los elementos. Sin embargo, para el propósito de este artículo solo se consideraron el Calcio (Ca), Potasio (K), Magnesio (Mg), Silicio (Si), Cinc (Zn), Níquel (Ni), Manganeso (Mn) y Hierro (Fe).



Aridic Endoaquerts de acuerdo con SSS (2022). Typic Dystruderts, de acuerdo con SSS (2022).

Figura 7. Paleosuelos “Mellizos”, secuencia poligenética, localizada entre 623 y 636 cm del núcleo N14, extraído del Pantano la Bramadora, Sopetrán, Antioquia. En el N14 se analizaron, por fluorescencia de rayos X (FRX) todos los elementos, aunque, para el propósito de este artículo, solo se consideraron el Calcio (Ca), Potasio (K), Magnesio (Mg), Silicio (Si), Cinc (Zn), Níquel (Ni), Manganeso (Mn) y Hierro (Fe).

Horizonte Cgb: 627-630 cm, color es 5G6/1, gris verdoso. Sin estructura; textura Arcillosa (Ar). Límite superior e inferior abrupto, definido por un cambio de color. pH 5.5. Materia orgánica aún reconocible; contienen fibras, fragmentos de tallos y de astillas de carbón, tejidos fúngicos y vegetales, esporas, semillas, agregados de pirita framboidal y coágulos. El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de 40%. Este horizonte presenta agrietamiento vertical. Los porcentajes de Mg y K tienen un comportamiento muy similar de menos de 2%; Ca es mayor pero más bajo que en el horizonte anterior (alrededor de 3%). El Al es muy bajo, menor de 5% y dista mucho del Sí que alcanza concentraciones de hasta 20%. Ni y Zn se presentan en centésimas, aumentando hacia la base, lo mismo que el Mn; el

Fe fluctúa entre 8 y 10%. En 629 cm sube la concentración Ca, Mg, K, Al y Si mientras que baja la de Zn, Ni, Mn y Fe.

Este paleosuelo fue clasificado como **Aridic Endoaquerts** de acuerdo con SSS (2022). Pudo haberse formado bajo un régimen de humedad ácuico en clima cálido húmedo, con grietas, tiene un epipedón órico y un endopedon cámbico; desarrollado en un relieve plano, inundable, a partir de sedimentos coluvio aluviales, moderadamente profundos a superficiales, drenaje imperfecto, limitado por un horizonte subsuperficial poco permeable. Vegetación natural herbácea con árboles como ceibas y matarratón, entre otros. En estos paleosuelos la hoploidización, dificulta la diferenciación de los horizontes.

4.2.4.2. Paleosuelo Inferior (entre 630 y 636 cm).

Horizonte 2Ab: 630-632 cm, color 2.5YR2.5/2, rojo muy oscuro, textura Arcillo Arenosa (ArA), estructura en bloques subangulares, finos, moderados. Límite superior abrupto, definido por un cambio de color, e inferior gradual. pH 5.5. Materia orgánica aún reconocible, altamente descompuesta y oxidada, principalmente hojas y tallos, se observan tejidos fúngicos, vegetales y animales, escasos estos últimos; hay esporas, semillas, fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal, y coágulos principalmente. El promedio del LOI fue de 36,67%. Este horizonte presenta agrietamiento vertical moderado. Los porcentajes de Mg y K tienen un comportamiento muy similar aumentando ligeramente con respecto al horizonte anterior.

Horizonte 2Bwgb: 632-634 cm, color 2.5YR2.5/2, rojo muy oscuro, textura Arcillo Arenosa (ArA), estructura en bloques subangulares, finos, moderados. Límites superiores abrupto, definido por un cambio de color, e inferior gradual. pH 5.0. Materia orgánica aún reconocible, oxidada, principalmente hojas y tallos largos, se observan tejidos fúngicos, vegetales y animales, escasos estos últimos; hay esporas, semillas, fragmentos de carbón, agregados de pirita framboidal, y coágulos. El promedio del LOI fue de 55,56%. Este horizonte presenta agrietamiento vertical moderado. Los porcentajes de Mg, K y Ca decaen bruscamente mientras que los demás elementos considerados suben, principalmente en 633 cm, luego decaen todos marcando la diferencia con respecto al horizonte subyacente.

Horizonte 2BCgb: 634-636 cm; color 2.5Y4/1, gris oscuro. Textura Arcillosa (Ar). Sin estructura. Límite superior abrupto, definido por un cambio de color, e inferior gradual pH 4.0. Este horizonte presenta agrietamiento vertical moderado. Materia orgánica aún reconocible, altamente descompuesta, muy oxidados, algunos tejidos vegetales, tejidos fúngicos escasos; algunas semillas, fragmentos de carbón y agregados de pirita framboidal. El LOI tuvo un valor promedio de 57,5%. Los porcentajes de Mg, K y Ca decaen y sus valores son muy cercanos entre sí. Este mismo comportamiento lo presentan el Al, Si, Zn, N, Mn y Fe, y en todos, aumenta la concentración en 636 cm.

Este paleosuelo fue clasificado como **Typic Dystruderts**, de acuerdo con SSS (2022). Pudo haberse formado bajo un régimen de humedad acuico, clima húmedo y muy húmedo, con grietas, tiene un epipedón ócrico y endopedon cámbico; desarrollado en un relieve plano, inundable, a partir de sedimentos lacustres, moderadamente profundos,

drenaje imperfecto. Vegetación natural herbácea con árboles como ceibas y matarratón, entre otros.

4.3. Paleosuelo entre 19-142 cm, Figura 8.

Horizonte Ab: 19-50 cm, abundante materia orgánica, aún reconocible, especialmente fibras gruesas, medianas y finas; hojas, tallos, raíces, semillas de tamaños variables, algunas de las cuales, en avanzado estado de descomposición, otras muy oxidadas. Internamente, el color así: de 19-26 cm, el color es 2.5Y3/2 pardo grisáceo muy oscuro. De 26-30 cm, el color es 2.5Y3/3 pardo oliva oscuro, altamente fibroso, con MO muy oxidada. Igualmente, entre 30-50 cm, el color es 2.5Y3/2 pardo grisáceo muy oscuro, textura ArL, estructura migajosa, materia orgánica muy oxidada.

Horizonte Bwgb: 50-100 cm, se observa abundantes fibras especialmente gruesas, medianas y finas, tallos, hojas y semillas, muy húmedas, fácilmente reconocibles. Entre 50-57 cm, se observa un cambio en el color que define dos secciones, la primera de 4 cm de color 2.5Y3/2 pardo grisáceo muy oscuro, con una materia orgánica muy oxidada. La segunda, en la parte inferior presenta un color 10Y6/1 gris verdoso y es ligeramente más húmeda. Entre 57-77 cm, se observa otro cambio de color 2.5Y3/2 pardo grisáceo muy oscuro, con abundante materia orgánica aún reconocible. Entre 77-79 cm, se observa una capa arenosa de 2 cm de espesor con líticos volcánicos (posiblemente basaltos Cretáceos). Entre 79-100 cm, otra capa turbosa de color 2.5Y3/3 pardo oliva oscuro, muy fibrosa y entre 83-100 cm, la turba se vuelve más húmeda, más fibrosa y el color cambia a G6/10Y, gris verdoso, las fibras son finas y muy oxidadas.

Horizonte 2Bwgb: 100-142 cm, abundantes fibras y materia orgánica reconocible; internamente presenta algunas particularidades como son: entre 100-105 cm, el color es 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro; en la parte media, de 105-107 cm, el color cambia ligeramente a 2.5Y5/1, gris verdoso, contiene fragmentos de carbón de hasta 0.3 cm; entre 107 y 114 cm, el color es 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro. De 114 a 118 cm el color es 2.5Y5/1, gris verdoso. Entre 119 y 144 cm, él es de color es 2.5Y4/2 pardo grisáceo oscuro, en la parte media y en la base abundantes fragmentos de carbón de hasta 0.5 cm de espesor. Son reconocibles tallos gruesos y fibras. Esta turba posee una gran acumulación de materia orgánica en descomposición. Su

espesor está relacionado con la cantidad de lluvia que debió caer y por el agua subterránea.

Los porcentajes de Mg y K son relativamente bajos en casi todo el segmento y se hacen un poco más altos y variables entre 118 y 144 cm; la concentración del Ca es mucho más alta en toda la turba, en 53-55 y a partir de 78 cm hasta 144 cm su valor es alto y fluctuante. En todos los casos la concentración no excede 1.5%. El Al y el Si siguen el mismo patrón de comportamiento descrito antes siendo más bajo el Al, con valores que no exceden 8.1% mientras que el Si no excede el 11.9%. El Ni y el Zn presentan valores relativamente altos que varían entre 5 y 20% siendo el Si el que tiene los más altos porcentajes. Ni y Zn presentan concentraciones extremadamente bajas que no exceden el 0,03%, sin embargo, Zn aumenta ligeramente en 58, 75

y 93 cm. El Mn también es extremadamente bajo y sigue la misma distribución de las bases, el Al y el Si. El Fe con una concentración más alta que no exceden 3.5%, se comporta de manera similar a la descrita para el Mn. Todos los elementos disminuyen su concentración baja donde el material se enriquece en arcillas.

Este paleosuelo fue clasificado como **Typic Haplofibrists**, de acuerdo con SSS (2022). Pudo haberse formado bajo un régimen de humedad ácuico y clima húmedo y muy húmedo; tiene un epipedón histico y un endopedón cámbico; desarrollado en un relieve plano, inundable, a partir de sedimentos lacustres, moderadamente profundos, drenaje imperfecto. Vegetación natural herbácea con árboles anfibios como ceibas y matarratón, entre otros.

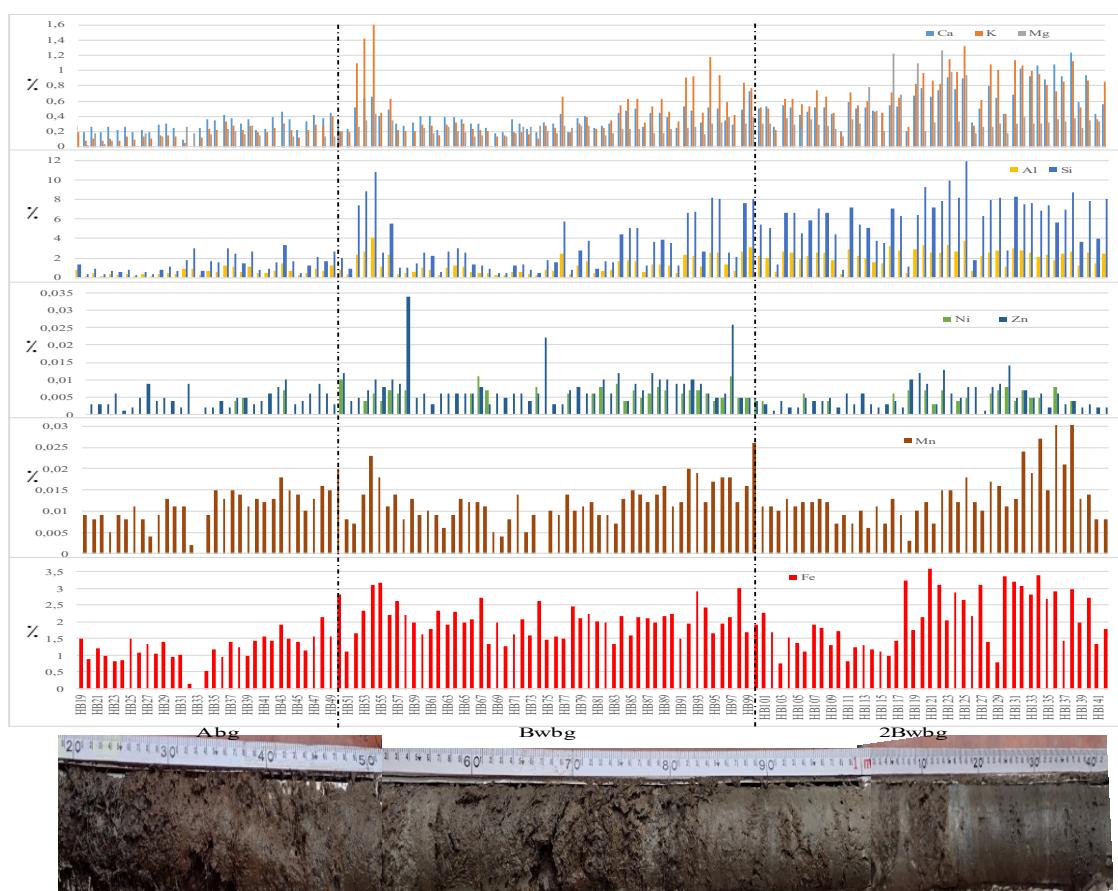


Figura 8. Paleosuelo clasificado como Typic Haplofibrists, de acuerdo con SSS (2022), localizado entre 19 y 144 cm del núcleo N14, extraído del Pantano la Bramadora, Sopetrán, Antioquia. En el N14 se analizaron, por fluorescencia de rayos X (FRX), todos los elementos, aunque, para el propósito de este artículo, solo se consideraron el Calcio (Ca), Potasio (K), Magnesio (Mg), Silicio (Si), Cinc (Zn), Níquel (Ni), Manganese (Mn) y Hierro (Fe).

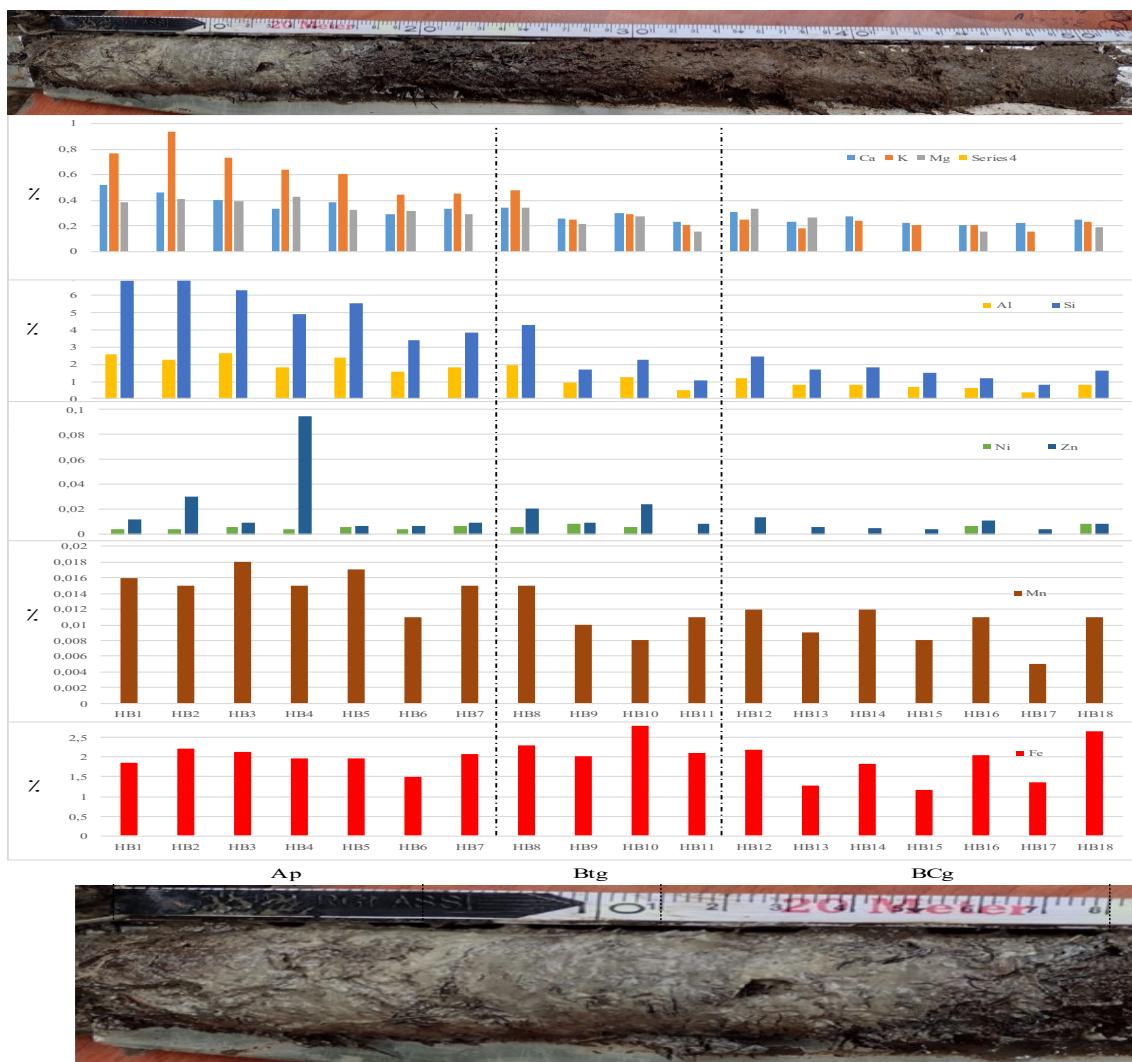


Figura 9. Suelo actual clasificado como Typic Endoaqualfs de acuerdo con SSS (2022), localizado entre 0 y 18 cm del núcleo N14, extraído del Pantano la Bramadora, Sopetrán, Antioquia. En el N14 se analizaron, por fluorescencia de rayos X (FRX) todos los elementos, aunque, para el propósito de este artículo, solo se consideraron el Calcio (Ca), Potasio (K), Magnesio (Mg), Silicio (Si), Cinc (Zn), Níquel (Ni), Manganeso (Mn) y Hierro (Fe).

4.4. Suelo actual comprendido entre 0-18 cm, (Figura 9).

Horizonte Ap: 0-7 cm; color 7.5YR4/2, pardo, textura Límosa (L), estructura migajosa. Límite inferior abrupto, definido por un cambio de color. Materia orgánica aún reconocible, ligeramente descompuesta; se observan fitolitos, tejidos fúngicos y vegetales, esporas, semillas. pH 6.5. Se observa dentro del horizonte condiciones redox y muchas fibras están altamente oxidadas. El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de 36,19%. Son abundantes las fibras orgánicas, de espesor medio (2 a 5 mm). Todos los elementos medidos presentan las más altas concentraciones en este horizonte siendo Ca, Mg, K, Al y Si, los que disminuyen hacia la base mientras que Fe y Mn son casi regulares. Ni y Zn son extremadamente bajos.

Horizonte Btg: 7-11 cm; color 2.5YR3/2, pardo grisáceo, textura Arcillosa (Ar); estructura en bloques subangulares, finos.

Presencia de cutanes de arcilla, comunes, definidos, discontinuos. Límites superior e inferior abruptos, determinado por un cambio de color. Materia orgánica aún reconocible, moderadamente descompuesta y oxidada; se observan fitolitos, diatomeas, tejidos fúngicos y vegetales, esporas, semillas. pH 6.5. Se observa dentro del horizonte condiciones redox y muchas fibras están altamente oxidadas. El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de 38,02%. En este horizonte todos los elementos medidos bajan su concentración excepto Fe, que se mantiene casi igual, los valores más bajos los presentan Ni, Zn y Mn.

Horizonte BCg: 11-18 cm, color es 5Y7/2 gris claro. Sin estructura; textura Arcillosa (Ar). Límite superior e inferior abrupto, definido por un cambio de color. pH 4.5. Materia orgánica aún reconocible; contienen fibras, fragmentos de tallos y te-

jidos fúngicos y vegetales, esporas, semillas. Posee características redoximórficas. El promedio de las pérdidas por ignición (LOI) fue de 39,52%. Presenta laminación muy fina de 4 mm, muy marcada por un cambio en el color de las láminas y entre ellas se alinean pequeños fragmentos de carbón (1 o 2 mm). Los elementos Ca, Mg, K, Al, Si, Ni y Zn disminuyen hacia la base mientras que Fe y Mn son casi regulares y aumentan ligeramente en el límite inferior. En todos los casos las concentraciones son muy bajas, ninguno supera el 35%.

Este paleosuelo fue clasificado como **Typic Endoaqualfs** de acuerdo con SSS (2022). Pudo haberse formado bajo un régimen de humedad ácuico en clima cálido húmedo, tiene un epipedón folístico y un endopedón argílico; posee características redoximórficas. Se ha desarrollado en un relieve plano, inundable, a partir de sedimentos coluvio aluviales, moderadamente profundos a superficiales, drenaje imperfecto, limitado por un horizonte subsuperficial poco permeable. Vegetación natural herbácea con árboles como ceibas y matarratón, entre otros. En estos paleosuelos la hoploidización, dificulta la diferenciación de los horizontes.

5. DISCUSIÓN

Los estudios sobre los climas del último milenio son importantes para comprender la influencia que tienen los cambios climáticos sobre los ecosistemas y las comunidades humanas y extraer posibles lecciones para manejar el actual cambio climático. Las mediciones de variables climáticas modernas son de corta duración, pero en las civilizaciones europeas y asiáticas con registros escritos largos, se complementan con anotaciones climáticas y de cosechas que ayudan mucho en este sentido.

Información climática del último milenio, también ha sido conservada en archivos naturales con resolución anual o subanual tales como anillos en árboles, estalactitas y corales y las láminas de los sedimentos varvados. La búsqueda de sedimentos de lagos y pantanos con registros temporales anuales, lo cual requiere tasas de sedimentación muy altas, al menos del orden de un centímetro de material por año, ha sido menos exitosa.

En Colombia existen multitud de estudios de núcleos sedimentarios con tasas de sedimentación de varias décadas o centurias por cada centímetro, lo cual ha permitido insinuar cambios importantes en el clima y los ecosistemas durante el último milenio e incluso ya existen estudios dendroclimáticos con resolución anual, pero longitudes temporales de pocas decenas de años que no alcanzan a cubrir los últimos mil años.

Se resalta la presencia de los dos paleosuelos desarrollados bajo condiciones áridas, ubicados entre 916-950 cm y separados

por una criptotefra ubicada en 933-934 cm. Estos dos paleosuelos son importantes porque se desarrollaron bajo un régimen de humedad árido y constituye el único registro que presenta esta condición en Suramérica, lo cual hace del núcleo N14 del Pantano La Bramadora un archivo paleoecológico de especial interés.

La edad reportada para estos paleosuelos, por AMS 14C de 800 ± 30 , equivalente a 1220-1291 cal AD, la hace coincidente con tres eventos importantes a nivel global como son: 1) en 1257 la explosión del Volcán Samalas en Indonesia, que tuvo un efecto global; 2) el decaimiento de la Cultura Maya en Centroamérica y la Cultura Zenu en Colombia y 3) el Calentamiento Medieval.

Llama la atención la condición de aridez dentro de un enclave cordillerano. En este contexto, Malagón (2003), había expresado que, desde el punto de vista de las relaciones pedológicas, varios aspectos son importantes: El primero de ellos radica en el efecto significativo de los cambios climáticos del Cuaternario ya que muchos suelos que presentan poligénesis se han enterrado o fosilizado. El segundo hace referencia, como lo indican Flórez y Parra (2024a), a las grandes tendencias que se presentan en zonas de muy alta precipitación en las vertientes de las cordilleras respectivas, enclaves secos y semiáridos al interior de los valles interandinos, muy amplia gama de precipitaciones, temperaturas y de evapotranspiración potencial asociadas con el relieve y con su influencia en la vegetación.

Las causas de la sequía no se conocen con precisión, pero se admite que, en general, se debe a alteraciones de los patrones de circulación atmosférica, que a su vez los ocasiona el calentamiento desigual de la corteza terrestre y de las masas de agua, manifestado en fenómenos como El Niño (Philander, 1990; Acosta, 1988); también la quema de combustibles fósiles, la deforestación, el cambio de uso del suelo y la actividad antropogénica en general contribuyen a la modificación de la atmósfera, y con ello de los patrones de precipitación.

Como lo citan Flórez y Parra (2024a), una de las catástrofes capaz de modificar en gran escala el ambiente de una región es la falta de agua, y sus efectos más espectaculares y dramáticos se manifiestan en la alteración de las actividades económicas habituales, en el deterioro de la calidad y condiciones de vida de los habitantes y en el daño a las condiciones ambientales (flora, fauna y paisaje). Sin embargo, la complejidad del fenómeno propicia la creencia errónea de que después de una sequía severa, no ocurrirá otra igual o de proporciones mayores. Por ende, con demasiada frecuencia, sobre todo en los países menos desarrollados, no es usual prepararse para su ocurrencia futura, que será una certeza (Wilhite, 1993). Esta es la paradoja que hace cada

vez más vulnerable a una sociedad que no genera medidas de prevención, porque no espera que vuelva a suceder lo mismo o algo peor.

Evidencias de condiciones de aridez registradas en la base del núcleo N14, podrían estar correlacionadas con capas de arena cuarcítica muy superficiales, líneas de piedra, depósitos residuales, formaciones de piedemontes pluviales, todos indicativos de erosión intensa, los cuales se han reportado en Belmira, Llanos de Cuivá (Parra y Jaramillo, comunicación oral) Santa Rosa de Osos, (Salazar et al., 2008), San Pedro de Los Milagros, en los valles de Riogrande, San Jerónimo, Sopetrán y Santafé de Antioquia (los autores del artículo), todos en el departamento de Antioquia, pareciendo indicar que estas condiciones climáticas también se presentaron, al menos, en estos sitios. Se recomienda, por lo tanto, hacer estudios geomorfo-pedológicos detallados en la zona de influencia del pantano La Bramadora y en los altiplanos norte y oriental de Antioquia para establecer posibles relaciones espaciales de paleoclimas entre ellas.

6. CONCLUSIONES

Se estima que el año 1050 AC marca el desarrollo permanente del pantano La Bramadora. Probablemente la cuenca discurría normalmente por las laderas hasta entregar sus aguas a la Quebrada Seca pero un abanico torrencial, transversal al valle principal, ocasionó un represamiento que dio forma al pantano. A este suceso le siguieron varios eventos de precipitación y/o sequía que dieron paso a la formación de paleosuelos y a la acumulación de estratos arcillas y material vegetal producto de la erosión pluvial y el escurrimiento; entre estas capas se formaron varios paleosuelos de escaso espesor a medida que cambiaban las condiciones ambientales y permitían su desarrollo. Estas condiciones permanecieron hasta 1795 AC y a partir de esta fecha, y hasta 2022, el clima mejoró sustancialmente para dar paso al pantano arbóreo que se ve hoy. Una discordancia cerca de la base (entre 850-870 cm), separa este grupo sedimentario de dos paleosuelos desarrollados bajo un clima árido, como lo evidencia la presencia de anhidrita (Wilson et al., 2013); estos paleosuelos están separados entre sí por una criptotefra.

En épocas de precipitaciones altas y bien distribuidas y con baja evapotranspiración se almacenan arcillas, se desarrolla una lámina de agua permanente durante todo el año y coloniza la vegetación herbácea incluyendo la presencia localizada de charcos con espejo de agua libre. Si las condiciones climáticas empeoran, se pierde la lámina de agua durante tiempos largos y desciende

el nivel freático facilitando el contacto prolongado con la atmósfera y la terrización que favorecen el enraizamiento de árboles anfibios y el desarrollo de la pedogénesis.

En todo este contexto en la precipitación es más determinante la forma como llueve que la cantidad de lluvia que cae en mm/h. La lluvia cae de tres maneras: Lluvia suave y prolongada, Lluvia fuerte y prolongada y Aguaceros fuertes cortos/largos. De igual forma es importante como se va sedimentando lo que se mueve por escorrentía, por ejemplo, aguaceros fuertes, prolongados o no, se reflejan en sedimentos de colores oscuros, mostrando que no solo se mueven materiales litológicos sino también abundante materia orgánica. Por el contrario, lluvias suaves prolongadas o no, se corresponden con sedimentos más claros.

En el núcleo N14 se pueden definir tres ambientes cílicos y alternados: 1) Ambiente con déficit de precipitación que permitió la dominancia de árboles anfibios; subordinados arbustos leñosos y hierbas ombrófilas, con un contenido de materia orgánica alto; 2) Ambiente con exceso de precipitación que permitió la dominancia de hierbas heliófilas, acuáticas y flotantes, con un contenido de materia orgánica bajo y 3) Ambiente con lámina de agua fluctuante que permitió la dominancia de hierbas heliófilas, arbustos leñosos y árboles anfibios y con un contenido de materia orgánica medio. En el techo del núcleo N14 se formó un suelo que permitió el desarrollo de un pantano arbóreo bajo una zona de vida de Bosque seco Tropical (Bs-T). En la base, dos paleosuelos separados por una criptotefra indican el establecimiento de un bosque terrestre bajo una zona de vida Bosque muy seco Tropical (Bms-T).

Durante el Periodo Cálido Medieval, el pantano aún no se había establecido y existían allí dos suelos terrestres clasificados como **Usteric Haplocambids** y **Ustic Haplogypsids**, desarrollados sobre una planicie pluvial bajo condiciones de extrema aridez que atestiguan la presencia en Colombia, en la tercera centuria, -1257 AC-, de temperaturas edáficas cercanas a 25°C y del aire por encima de 35°C, elevadas evapotranspiraciones, aguaceros intensos concentrados en pocos meses y elevadas torrenzialidades. Este clima persistió durante varias centurias ya que el grado de desarrollo de estos suelos requiere centenares de años y debió tener efectos críticos sobre las poblaciones humanas y los ecosistemas. Los efectos de este clima más allá del Valle del Cauca ameritan serias investigaciones; ello pudo ocasionar el declinamiento de las civilizaciones Maya y Zenú en América dada una gran sequía, que originó presiones por el agua.

Los paleosuelos que se destacan en este trabajo fueron:
Paleosuelos entre 916 y 950 cm, datado en 800±30 BP. (1220-1291 cal AD).
 Basal: Ab-Bwb. Ustic Haplogypsids.

Techo poligenético: Inferior: 2Ab-2Bwb. Ustertic Haplocambids. Superior: Ab-Bwb. Aquertic Eutrudepts

Paleosuelo entre 870 y 882 cm, datado en 700 ± 30 BP. (1340 – 1392 cal AD).

Con tres horizontes: Agb-Bhgb-BCgb. Torreric Dystrustepts.

Paleosuelos Mellizos entre 623 y 636 cm, poligenético, datado en 360 ± 30 BP. (1482–1644 cal AD).

Inferior: 2Ab-2Bwgb-2BCgb. Typic Dystruderts. Superior: Ab-Bwgb-Cgb. Aridic Endoaquerts.

Paleosuelo entre 19 y 142 cm: Abg-Bwgb-2Bwgb. Typic Haplafibrists.

Suelo Actual: Ap-Btg-BCg. Typic Endoaqualf.

Los dos paleosuelos basales son importantes porque se desarrollaron bajo un clima árido y constituyen el único registro que presenta esta condición en Suramérica, en el último milenio, lo que convierte el núcleo N14 del Pantano La Bramadora en un archivo paleoecológico de especial interés. La edad reportada para estos paleosuelos la hace coincidente con tres eventos importantes a nivel global como son: 1) en 1257 la explosión del Volcán Samalas en Indonesia que tuvo un efecto global, 2) el decaimiento de la Cultura Maya en Centroamérica y la Cultura Zenú en Colombia, y 3) el Calentamiento Medioeval.

Una de las catástrofes capaz de modificar en gran escala el ambiente de una región es la falta de agua, y sus efectos más espectaculares y dramáticos se manifiestan en la alteración de las actividades económicas habituales, en el deterioro de la calidad y condiciones de vida de los habitantes y en el daño a las condiciones ambientales (flora, fauna y paisaje). Sin embargo, la complejidad del fenómeno propicia la creencia errónea de que después de una sequía severa, no ocurrirá otra igual o de proporciones mayores. Por ende, con demasiada frecuencia, sobre todo en los países menos desarrollados, no es usual prepararse para su ocurrencia futura, que será una certeza (Wilhite, 1993). Esta es la paradoja que hace cada vez más vulnerable a una sociedad que no genera medidas de prevención, porque no espera que suceda lo mismo o algo peor.

FINANCIACIÓN

Esta investigación fue aprobada por el Comité de Investigación de la Universidad de Antioquia –CODI–, e inscrita en el Sistema de Investigación de la Sede de Investigación de la Universidad de Antioquia –SIIU–, con el Código 2022-48550. Bajo el proyecto de Investigación titulado: “Evidencias de eventos de precipitación extremos registrados a escala subanual en los sedimentos del Humedal La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia”. Dicho proyecto ha sido financiado por la Universidad

de Antioquia, Facultad de Ingeniería y los Grupos de Investigación GAIA, a través de recursos propios y de SIDEMAT con el préstamo de equipos, ambos de la Universidad de Antioquia.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o relaciones personales que puedan haber influido en el trabajo reportado en este artículo

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Grupo de Investigación en Gestión y Modelación GAIA, al Departamento de Materiales, y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia por el apoyo incondicional. A Luna, por su constante acompañamiento y su amor. A nuestras familias por su paciencia. De manera especial al Editor y todo el equipo de la Revista, del mismo modo, a los revisores del artículo.

REFERENCIAS

- Acosta-Michlik, L., (2008). A critical overview: Local evidence on vulnerabilities and adaptations to global environmental change in developing countries. *Global Environmental Change Volume 18*, No. 4.
- Boussingault, J.B. (1849). Viajes científicos a los Andes ecuatoriales. Colección de memorias sobre física, química e historia natural de la Nueva Granada, Ecuador y Venezuela, presentadas a la Academia de Ciencias de Francia. París: Librería Castellana, Lasserre Editor.
- Brenner, M., Leyden, B. W., Binford, M. & Hodell, D., (2001). Abrupt climate change and PreColumbian Cultural Collapse. Cap. 6. Interhemispheric climate linkages. En: https://sites.pitt.edu/~mros-enme/Brenner_et_al_2001.pdf
- Europa Press | ELMUNDO.es | Madrid, (2010). Los Veintisiete subrayan la urgencia de un acuerdo vinculante sobre el clima. En: https://www.elmundo.es/elmundo/2010/10/29/union_euro-pea/1288354160.html
- Fagan B. M. (2009). El gran calentamiento. Cómo influyó el cambio climático en el apogeo y caída de las civilizaciones, Gedisa Editorial, Barcelona, 2009, 350 pp.
- Fagan B. M. (2008). La pequeña edad de hielo. Cómo el clima afectó a la historia de Europa. 1300-1850, Gedisa, Barcelona, 2008.
- Flórez-Molina, M.T., Parra-Sánchez, L.N. (2025). Criptotefras del volcánismo tropical en el último milenio preservadas en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico*, 52(1). DOI: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.52.1.2025.722>
- Flórez Molina, M.T., Parra Sánchez, L.N. (2024a). Indicadores de la paleoprecipitación interanual preservada en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Colombia. *Boletín Geológico*, 51(1). DOI: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.51.1.2024.726>

- Flórez-Molina, M.T. y Parra-Sánchez, L.N. (2024b). Mineralogía, granulometría y facies asociadas a sedimentos de fondo en tres embalses de Empresas Públicas de Medellín. Boletín De Ciencias De La Tierra. 55, pp. 21 - 41. DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct. n 55.111438>
- Flórez M.T., Parra L.N., Abril G. y Monsalve C. (2023a). 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>
- Flórez M.T., Parra, L.N. y Calderón J.A. (2023a). Evidencias de eventos extremos de precipitación y de explosiones volcánicas entre 1455-2022, cal 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>
- Flórez M.T., Parra L.N. (2023b). Datos del Núcleo 14 - Sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. Boletín Geológico, 50(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.50.2.2023.712>
- García C.Y. y Martínez H.I. (2009). El periodo cálido medieval y la pequeña edad de hielo en el Neotrópico. Rev. Acad. Col. Cienc. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 33 (129): 477-489, 2009. ISSN 0370-3908.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –Ideam– (2024). Colombia se enfrentará a tres emergencias climáticas en el segundo semestre de 2024. En: <https://www.swissinfo.ch/spa/colombia-se-enfrentar%C3%A1-a-tres-emergencias-clim%C3%A1ticas-en-el-segundo-semestre-de-2024/77731245>
- ones, P. D., and M. E. Mann (2004). Climate over past millennia, Rev. Geophys., 42, RG2002, doi:10.1029/2003RG000143
- Jones Mann (2003). El clima durante los últimos milenios. Reseñas de Geofísica, 2003.33. Pequeño y Alabama., A
- Kennett, D.J., Masson, M., Lope, CP et al. (2022). Conflicto civil inducido por sequía entre los antiguos mayas. Nat Comun 13, 3911 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31522-x>
- Leyden, B., Brenner, M., Hodell, D., and Curtis, J., (1994). Orbital and internal forcing of climate on the Yucatan Peninsula for the past 36 ka. Paleoclimatology Paleogeography Paleoecology 109, pp. 193-210. [online]. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Gerald-Islebe/publication/287949229_La_vegetacion_de_Guatemala_durante_el_Pleistoceno_Terminal_y_Holocene/links/58333aca08ae102f07368052/La-vegetacion-de-Guatemala-durante-el-Pleistoceno-Terminal-y-Holocene.pdf
- Lüning S., et al. (2019). The Medieval Climate Anomaly in South America, Quaternary International. Volume 508, 2019, Pages 70-87, ISSN 1040-6182, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.041>.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040618218308322>)
- Luterbacher, J. et al., (2016). European summer temperatures since Roman times. Environmental Research Letters, 11(2), art. 024001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024001>
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., and Wanner, H., (2004). European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500 Science 303 pp. 1499-1503. [online]. Available at: https://www.academia.edu/22973165/European_summer_temperatures_since_Roman_times
- Malagón Castro, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos -Énfasis en génesis y aspectos ambientales- Rev. Acad. Colomb. Cienc. 27(104): 319-341. 2003. ISSN 0370-3908
- Marshall et al. (2025). Last Millennium Volcanic Forcing and Climate Response using SO₂ Emissions, EGUSphere [pre-print], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1322>
- Mora Pacheco, K. (2019). Tras la pista de “terribles veranos” y “copiosas lluvias”. Elementos para una historia climática del territorio colombiano.
- Núñez Cobo, J. y K. Verbist (Eds.). 2018. Atlas de Sequía de América Latina y el Caribe. UNESCO y CAZALAC, 204p.
- Orlove, B., (2005). Human adaptation to climate change: a review of three historical cases and some general perspectives. Environment Science & Policy, 8(6), pp. 589-600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.06.009>
- Pabón C.D., (2006). El clima en Colombia durante los siglos XVI-XIX a partir de material histórico. Parte I: Inventario de fuentes de información. Cuadernos de Geografía 15. 2006. ISSN: 0121-215X. Bogotá, Colombia. Pp. 75-91.
- Plazas, C., Falchetti, A.M., Sáenz, J. y Archila, S., (1993). La Sociedad Hidráulica Zenú. Estudió arqueológico de 2000 años de historia en las llanuras del Caribe Colombia Bogotá: Banco de la República, Museo del Oro. [en línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/41133439/LA_SOCIEDAD_HIDR%C3%81ULICA_ZEN%C3%9A
- Philander S. G. 1990. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. ix + 293 pp. San Diego, New York, Berkeley, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press (Harcourt Brace Jovanovich). Price £42.50 (hard covers). ISBN 0 12 553235 0. International Geophysics Series Vol. 46.
- Preiser K. J. (2022). The Medieval Climate Anomaly, the Oort Minimum and socio-political dynamics in the Eastern Mediterranean and the Byzantine Empire, 10th to 12th century. Adam Izdebski/Johannes Preiser-Kapeller (eds.), A Companion to the Environmental History of Byzantium (Brill's Companions to the Byzantine World). Leiden 2023 (under review). En: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252118852>
- Romá, A. A. (2015). El Cambio Climático Medieval. Historia National Geographic 147, pp 71-85.
- Ruddiman, W.F., (2008). Los tres jinetes del cambio climático. Una historia milenaria del hombre y el clima.
- Salazar S., González H., y Arias L., (2008). Litoestratigrafía y pedoestratigrafía de los depósitos recientes en el Altiplano de Santa Rosa de Osos (ASRO). Boletín de Ciencias de La Tierra. No. 23, junio 2008. ISSN 0120-3630. Pp 21-32
- Schorndorf N., (2024). Soil-Sensitive Proxies in Northeast Yucatán Speleothems Since the Classic Maya Period. Dissertation Thesis PhD. 245p. En: <https://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/35843/>.
- Soil Survey Staff (SSS). (2022). Keys to Soil Taxonomy, 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service. Stoffel M. et al.

- (2015) Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1.500 years. Nat Geosci 8:784–788. <https://doi.org/10.1038/ngeo2526>
- Thompson, LG, Mosley-Thompson, E., Dansgaard, W., y Grootes, PM (1986). La LIA tal como se registra en la estratigrafía de la Capa de hielo tropical Quelccaya, Science, 234, 361-364, Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático. Available from: https://www.researchgate.net/publication/259235400_Glaciares_de_los_Andes_Tropicales_victimas_del_Cambio_Climatico
- United Nations Convention to Combat Desertification -UNCCD – (2024). Atlas Mundial de Sequía. En: <https://www.unccd.int/es/news-stories/press-releases/world-drought-atlas-reveals-systemic-nature-hazard-risks-calls-national>
- Ulf Büntgen, et al. (2024). Recent summer warming over the western Mediterranean region is unprecedented since medieval times, Global and Planetary Change, Volume 232, 2024, 104336, ISSN 0921-8181, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104336>. En: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818123003107>)
- Wilhite, D. A. (1993), Preparing for Drought: A Guidebook for Developing Countries, Nairobi, United Nations Environment Programme-Climate Unit.
- Wilson, B.T., Woodall, C.W. & Griffith, D.M. (2013). Imputing forest carbon stock estimates from inventory plots to a nationally continuous coverage. Carbon Balance Manage 8, 1 (2013). <https://doi.org/10.1186/1750-0680-8-1>.