

Review article

Criptotefras del volcanismo tropical en el último milenio preservadas en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

Cryptotephra of tropical volcanism in the last millennium preserved in the sediments of the Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia

María Teresa Flórez-Molina¹ , Luis Norberto Parra-Sánchez² 

¹Universidad de Antioquia, calle 67 No. 53 - 108, Medellín, Colombia

²Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Carrera 65 Nro. 59A - 110, Medellín, Colombia

RESUMEN

El Pantano La Bramadora se ubica en la Vereda La Puerta, Municipio de Sopetrán, Antioquia, a 535 m s.n.m., en la zona de vida bosque seco tropical (Bs-T). Este se encuentra en la parte baja de la cuenca fluvial la cual se halla desarrollada sobre rocas sedimentarias de la Formación Amagá, Miembro Superior, en el flanco oeste del Sinclinal de Ahuyamal donde dominan areniscas y arcillolitas de colores pardo a pardo rojizo, y espesos bancos de conglomerados con cantos redondeados heterométricos y heterogéneos soportados por una matriz areno limosa de color pardo rojizo. Existen zonas con regolitos de alteración de pocos metros de espesor desarrollados a partir de esas rocas sedimentarias.

Los sedimentos del pantano guardan evidencias de eventos volcánicos globales y locales, que se pueden visualizar a través de la presencia de “criptotefras” (pequeñas esquirlas de vidrio volcánico y/o fragmentos de matriz cuyos tamaños varían entre 5-10 μm), estas son huellas dactilares del volcanismo tropical ocurrido en el último milenio.

El objetivo central del artículo es documentar las criptotefras preservadas en los sedimentos del Pantano La Bramadora y su relación con marcadores microscópicos y geoquímicos.

Palabras clave: Erupciones, Volcanes, Sedimentos, Minerales, Vidrios volcánicos, Fragmentos de matriz.

ABSTRACT

The “Pantano La Bramadora” is in Vereda La Puerta, Municipality of Sopetrán, Antioquia, at 535 meters above sea level, in the tropical dry forest life zone (Bs-T). This is in the lower part of the river basin which is developed on sedimentary rocks of the Amagá Formation, Upper Member, on the western flank of the Ahuyamal Syncline, where sand-stones and claystone of brown to reddish brown colors dominate. and thick banks of conglomerates with heterometric and heterogeneous rounded edges supported by a reddish-brown silty sand matrix. There are areas with alteration regolith a few meters thick developed from these sedimentary rocks.

The swamp sediments contain evidence of global and local volcanic events, which can be visualized through the presence of “cryptotephra” (small shards of volcanic glass and/or fragments of matrix whose sizes vary between 5-10 μm), these They are fingerprints of tropical volcanism that occurred in the last millennium.

The main objective of the article is to document the cryptotephra preserved in the sediments of the La Bramadora Reservoir and their relationship with microscopic and geochemical markers.

Keywords: Groundwater, hypogeum, epigeum, nutrients, testate amoebae, microorganisms.

Citación: Flórez-Molina, M.T., Parra-Sánchez, L.N. (2025). Criptotefras del volcanismo tropical en el último milenio preservadas en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico*, 52(1)

<https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.52.1.2025.722>

Boletín Geológico: ISSN impreso: 0120-1425, ISSN electrónico: 2711-1318.  This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Manuscrito recibido: Abril 21, 2024; Revisión recibida: Agosto 28, 2024; Aceptado: Septiembre 13, 2024

1. INTRODUCCIÓN

El Pantano La Bramadora en Sopetrán, Antioquia, Colombia, alberga, por lo menos, 950 cm de sedimentos que incluye arcillas, paleosuelos, leves discordancias estratigráficas, y criptotefras que pudieran estar relacionadas con eventos volcánicos de distribución global o grandes explosiones detectables en varios países del trópico durante el último milenio.

Capas y láminas de tefras visibles a simple vista en los registros sedimentarios del Cuaternario de Colombia han sido ampliamente documentadas, pero aquellas explosiones volcánicas solo han sido detectadas mediante criptotefras (trazas de partículas volcánicas microscópicas muy finas) y/o marcadores geoquímicos; son escasas o se han considerado contaminaciones. Numerosas investigaciones en el mundo se han focalizado hacia las criptotefras ya que permiten evidenciar como ha sido el volcanismo de escala planetaria y sus efectos sobre el clima y las civilizaciones humanas. Tal es el caso, de los núcleos de hielo de la Antártida y Groenlandia.

La cuenca La Bramadora ofrece un caso especial ya que carece de suelos derivados de cenizas volcánicas (andisoles) y, por lo tanto, solo los saprolitos de las rocas están suministrando sedimentos mediante erosión pluvial intensa y por avenidas torrenciales, y de este modo el registro sedimentario está libre de contaminaciones de materiales volcánicos producto de la erosión, estos solo se reciben vía atmosférica como partículas y/o aerosoles.

Este artículo plantea como objetivo documentar las criptotefras preservadas en los sedimentos del Pantano La Bramadora y su relación con marcadores microscópicos y geoquímicos, además, complementar el conocimiento sobre los sedimentos del pantano, el cual, se ha consignado en cuatro artículos ya publicados por los autores (Flórez, Parra y Calderón (2023), Flórez et al. (2023), Flórez y Parra (2023) y Flórez y Parra (2024)).

1.1 Estado del arte sobre Criptotefras

Evidencias de la ocurrencia de explosiones volcánicas no visibles a simple vista en las rocas, sedimentos o núcleos de hielo, son cada vez más importantes, en este artículo se presenta una revisión del estado actual de su estudio tanto a nivel global como local, desde lo más actual a lo más antiguo, hecho que permite mostrar la evolución en su conocimiento.

Paul et al. (2024) investigan las capas no visibles de tefra (criptotefra) conservadas en los sedimentos laminados del Lago Suigetsu, Japón y fechados con ^{14}C , procedentes del Ulleungdo (U)-Oki (10,2 ka) y el Sambe Sakate (19,6 ka), y en consecuencia abarca un intervalo de cambio climático abrupto que hace que

cualquier capa de criptotefra recientemente identificada sea un marcador cronoestratigráfico invaluable.

Alessio et al. (2023) trabajan la tefrocronología de un núcleo de sedimentos marinos de 14.49 m de largo (TR 17-08) recolectado en la ensenada de Edisto, Mar de Ross (Antártida). Detectan en el núcleo cuatro capas de criptotefra entre 55 y 525 cm de profundidad que facilitan las correlaciones de alta precisión y ayudan a limitar estratigráficamente los cambios en las condiciones ambientales y climáticas.

Cook et al. (2023) indican que bajas concentraciones de fragmentos de vidrio, "criptotefras", como depósitos estratigráficamente distintos en núcleos de hielo y sedimentos marinos y terrestres son representativas de la geoquímica general del magma y, por lo tanto, son una huella distintiva para rastrear depósitos hasta fuentes volcánicas específicas y con fines de correlación.

Qian et al. (2022) plantean que la detección indirecta de criptotefra en lutitas negras se ha convertido en un aspecto clave de la edad y correlación estratigráfica, la variación ambiental, el cambio climático y el enriquecimiento de materia orgánica en relación con las erupciones volcánicas.

Walsh et al. (2021) demuestran como las criptotefras individuales conservadas dentro de sedimentos varvados pueden fecharse con precisión y permitir la correlación directa de sitios dentro de los cuales se identifican los mismos depósitos.

Cottet (2020) realiza la reconstrucción de la historia del volcanismo explosivo postglacial en el sector norte de la Patagonia, alrededores del lago Épulafquen y sur del volcán Lanín, al suroeste de Neuquén, Argentina, a partir de tefras en sedimentos lacustres.

McLean et al. (2018) muestran el potencial de las capas de tefra para sincronizar archivos paleo ambientales dispares en escalas regional a hemisférica integran, además, eventos eruptivos.

Delaine et al. (2016) indican como las criptotefra constituyen un registro clave para monitorear la actividad volcánica pasada y actual.

Kutterolf et al. (2015) sugieren comparar las variaciones en las concentraciones de Br y Cl y las proporciones mínimas de Cl/Br en inclusiones fluidas del vidrio volcánico con oligoelementos geoquímicos (U/La, Ba/Th) e isótopos de plomo.

Zielinski (2002) dice que las erupciones volcánicas tienen el potencial de forzar el cambio climático global, siempre que sean lo suficientemente explosivas como para emitir al menos entre 1 y 5 megatonnes de gases de azufre a la estratosfera. Las erupciones ecuatoriales pueden afectar el clima global, mientras que los eventos de latitudes medias a altas afectarán el hemisferio de origen.

Lowe and Hunt (2001) indican que la palabra tefra, es un término que agrupa a todos los materiales primarios, es decir, productos piroclásticos no consolidados provenientes de una erupción volcánica. El significado y aplicabilidad de este término incluyen la tefroestratigrafía, tefroconometría, tefrología y criptotefra.

De Silva y Zielinski (1998) proponen que el gas y las cenizas finas procedentes de grandes erupciones explosivas ecuatoriales pueden propagarse por todo el mundo y que el ácido sulfúrico que se produce en la estratosfera puede provocar un enfriamiento pequeño, pero estadísticamente significativo, de las temperaturas globales. Plantean que la erupción del Huaynaputina, Perú, en 600 AC, fue una de las más grandes de los últimos 500 años.

Zielinski, et al. (1994) evalúan el impacto climático de la erupción del Monte Asama (Japón) en 1783 AC, la cual se complica por la erupción simultánea de Laki (Islandia). Suponen que las emisiones de azufre de la erupción de 1783 AC fueron solo un tercio de las del evento de 1108 AC, 3,5 Tg de H₂SO₄, profundidad óptica estratosférica de 0,029.

Fiacco et al. (1993) muestran que el núcleo de hielo GISP2 contiene fragmentos de vidrio volcánico riolítico que corresponde a la erupción del Monte St. Helens entre 1479-1480 AC; su tamaño es muy grueso (hasta 40 µm de diámetro), lo que sugiere un rápido transporte desde su origen hasta Groenlandia.

Palais et al. (1992) hablan de una fuerte señal de H₂SO₄ volcánico en núcleos de hielo de 1259 AC en Groenlandia, Antártida y el Ártico de Canadá. Detectan pequeños fragmentos de vidrio volcánico (<5 µm) en un núcleo de hielo del Polo Sur e indican que la composición de estos en la muestra de Groenlandia es idéntica a la del Polo Sur, y es similar a la que produjo entre 550 y 700 años, la erupción del volcán El Chichón en México, lo que sugiere que puede ser la fuente del material ampliamente disperso.

1.2 Erupciones volcánicas - Índice de Explosividad Volcánica (VEI)

Diversos estudios han concluido que las erupciones volcánicas más violentas de la historia superan en más de 100 veces la energía que liberaría la explosión de todo el arsenal nuclear mundial. Se ha creado una escala de 0 a 8 grados conocida como el Índice de Explosividad Volcánica (VEI, En: <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/vulcanologia/4573-vei>), mide tanto el volumen de material expulsado como la altura de la pluma explosiva. Los índices 7 y 8 están reservados para explosiones supermasivas típicas de los súper volcanes, con calderas magmáticas mil veces más grandes que uno convencional.

La erupción más violenta del Cuaternario creó la Caldera de Toba (Indonesia), con un índice de VEI de 8, se ocasionó hace aproximadamente 70000 años y extinguió al 60% de la especie humana, mientras que la más violenta registrada por observadores humanos, fue el Tambora (Indonesia) en 1815 cal AD, que alcanza el VEI de 7. Estas erupciones súper masivas, oscurecieron el cielo de todo el planeta, mataron centenares de miles de personas, sepultaron ciudades y civilizaciones enteras. Erupciones con índices VEI entre 4 y 6, arrojan volúmenes de materiales entre 0.1 y 10 km³ y sus plumas eruptivas suelen llegar hasta la estratosfera y son capaces de afectar múltiples países, como el caso del Pinatubo en 1991 cal AD. Las erupciones volcánicas supermasivas y grandes, producen enormes cantidades de aerosoles volcánicos e incluso son capaces, en algunas ocasiones, de inducir severos cambios climáticos o inviernos volcánicos.

Pérez (2021), indica que la primera conexión científica entre las erupciones volcánicas y las variaciones en el clima de la tierra la estableció el estudio, de la Comisión Krakatoa, que con un cierto aire poético el informe de la comisión describía así los efectos observados a consecuencia de la erupción del volcán en 1883: "...atenuación y desenfoque de los objetos celestes, color azul o verde inusual del Sol y la Luna, amaneceres y atardeceres realizados con resplandores de color lavanda que aparecen por encima del horizonte, anillos solares (un halo completo alrededor del Sol) y también eclipses lunares muy oscuros..." (En: <https://quo.eldiario.es/naturaleza/q2202923949/la-nueva-erupcion-del-volcan-krakatoa/>).

1.3 Registro histórico de erupciones volcánicas en el trópico

En el trópico, se encuentran numerosos complejos volcánicos y volcanes que a través del tiempo han tenido, al menos, un evento volcánico que han impactado positiva o negativamente los ecosistemas y las poblaciones humanas y animales. En este aparte, solo se mencionan los volcanes que pudieron haber dejado una huella dactilar, expresada como criptotefra, en los sedimentos del Pantano La Bramadora, tanto en el mundo como en Colombia.

Volcán Ilopango, El Salvador (cal AD, 500-431). Brown et al. (2023), habla sobre la erupción piroclástica del año 431 Cal AD, con un VEI 6, nombrada Tierra Blanca Joven - TBJ (volumen DRE de 30-90 km³), es una de las mayores erupciones de los últimos dos milenios. La erupción devastó la civilización Maya de Centroamérica; comenzó con una breve fase de ceniza y piedra pómez, luego, paso a una fase explosiva "húmeda" durante la cual fluyeron corrientes piroclásticas que conformando un depósito de

30 m de ignimbritas, no soldadas. Pedrazzi et al. (2019), describe la erupción que ocurrió hace cerca de 1500 años (entre 70 y 535 cal AD), que dispersó cenizas volcánicas y corrientes de piroclastos. La sucesión de depósitos generados por la erupción de TBJ se han reportado en Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y el Océano Pacífico y en núcleos de hielo.

Volcán Monte Paektu, entre Corea del Norte y China (946 cal AD). Estratovolcán cuya caldera es parcialmente ocupada por las aguas del lago Tianchi (lago del Cielo), se creó en torno al 946 Calc. AD, durante la llamada "erupción del milenio", con un VEI de 7,3 expulsó de 100 a 120 km³ de piroclasto y pudo afectar al clima de la región, Jiandong et al. (2013). Se han encontrado restos de ceniza de esa erupción incluso en el sur de la isla de Hokkaido, al norte del Japón (En: https://es.wikipedia.org/wiki/Monte_Paektu).

Eclipses Lunares versus Volcanismo (1110, 1172, 1229, 1258 y 1276 cal AD). Con base en la siguiente crónica sobre "en busca de volcanismo": Comentario del Apocalipsis por Beato de Liébana, del monasterio de Santo Domingo de Silos, cerca de Burgos, España, 1090-1109 DC, que habla de la relación entre eclipse total de sol, y eclipse total de luna, reza: "*hic sol obscurabitur et luna in sanguine versa est*" ("y el Sol se oscureció y la Luna se convirtió en sangre"), científicos de la Universidad de Ginebra se hicieron una curiosa pregunta: ¿cómo se vinculan los eclipses lunares con la erupción de volcanes? Para responderla, revisaron una serie de textos escritos entre los siglos XII y XIII (Edad Media) en China, Corea, Japón, Europa y el mundo árabe, buscando observaciones creíbles de eclipses lunares. Asociaron volcanes activos con eclipses y de 37 que analizaron, seis fueron "muy oscuros", correlacionables con eventos volcánicos ocurridos en 1110, 1172, 1229, 1258 (2) y 1276 cal AD y concluyen que el brillo de la luna durante el eclipse es muy sensible a la abundancia de aerosoles en la estratosfera, eclipses lunares totales oscuros indican una alta turbidez, mientras que un disco rojizo podría significar una estratosfera clara (En: <https://www.elespectador.com/ciencia/lo-que-las-chronicas-medievales-nos-dicen-de-las-erupciones-volcanicas/>).

Volcán Nevado del Ruíz, Colombia (1245, 1350, 1527, 1595, 1805, 1845, 1985, cal AD). Según Espinosa (2001), las descripciones históricas aportan datos sobre la actividad del Ruíz durante sus ciclos eruptivos. La erupción de 1985 se inicia más o menos un año antes, sigue un proceso progresivo y se prolonga por varios años decreciendo lentamente. El volcán empezó a lanzar grandes cantidades de gases ricos en azufre, el contenido de agua de las fumarolas se redujo, y las fuentes de agua cercanas se enriquecieron en Mg, Ca y K lixiviados del magma. La

erupción explosiva desencadenó un enorme lahar que enterró la cabecera urbana de Armero, lo que se conoció como la tragedia de Armero, aproximadamente, 25 mil personas pierden la vida, por lo que se le considera como la segunda erupción volcánica más devastadora en vidas humanas del siglo XX, tras la erupción del Monte Pelee de la Isla Martinica.

En 1845, se produjo erupción de lodo del volcán del Ruíz y de la catástrofe de Lagunillas, algo similar a un lahar, precisándose en los escritos que "...era la primera vez, que el hombre recuerde que los habitantes de las orillas ardientes del Magdalena hayan visto de cerca agua solidificada por el frío. La actividad del Ruíz en 1595 consistió de tres erupciones plinianas que llegaron a oírse a más de 100 km de la cima y una gran cantidad de ceniza, lapilli y bombas fueron expulsadas, lo que oscureció el área circundante por tres días y no se vio el sol; la erupción produjo 0,16 km³ de tefra y estuvo precedida por un terremoto, tres días antes. La erupción causó lahares, que viajaron por los valles de los ríos Gualí y Lagunillas. En 1805, la erupción fue de tipo pliniana, dio origen a rápidas tortugas de gas caliente y flujos piroclásticos.

Eslava (1985), indica que la primera erupción del 13 de noviembre de 1985 originó una nube o penacho constituido por gases, ceniza y pequeñas piedrecillas que se enrumbó hacia el oriente. Los datos tomados por el satélite Nimbus 7, muestran valores muy altos de SO₂ distribuidos en una nube irregular en forma de arco que se extendió entre 200 km al S y 900 km al este del cráter y entre 100 y 200 km al sur oeste.

Krueger, citado por Espinosa (2001), estimó preliminarmente que la nube contenía cerca de 500.000 t de SO₂.

Cepeda et al. (1986), informan que la emisión de SO₂ el 13-11-1985 fue cercana a las 700.000 t. Los gases de SO₂ sí lograron penetrar la barrera de la tropopausa e introducirse en la estratosfera, gracias seguramente a la altísima temperatura y empuje con el que salieron del cráter y, por supuesto, a la alta energía cinética que poseían y que les dio la característica gaseosa; sin embargo, la nube de cenizas no logró llegar a la estratosfera. Eslava (1985, 1994), reporta que uno de los principales efectos de la ceniza fue el de contribuir a la producción de torrenciales aguaceros en todo el norte del Tolima y sectores aledaños.

Volcán Samalas, Indonesia (1258 cal AD). Campbell (2017), indica que la explosión de 1258 cal AC, tuvo un VEI=7, los productos que arrojó a la atmósfera ocasionaron el forzamiento solar de los climas globales responsable del clima inusualmente inestable.

Volcán Chichón, México (1259 Calc. AD, 1982 cal AD). Macías (2005), habla sobre la explosión del Volcán Chichón, de

1982, el magma entró en contacto con agua, produciendo una explosión hidromagmática violenta que destruyó completamente el domo central y generó oleadas piroclásticas húmedas, las cuales viajaron hasta 8 km del cráter arrasando con todo lo que encontraban a su paso; luego, se produjo una segunda columna pliniana de 32 km de altura rica en líticos, la cual colapsa formando flujos piroclásticos. Cuatro horas más tarde, en la madrugada del 4 de abril, el volcán reinició su actividad con otra explosión que formó una tercera columna pliniana, que alcanzó 29 km de altura y fue dispersada nuevamente hacia el noreste.

Volcán Popocatepetl, México (1363, 1997, 2001 cal AD).

Macías (2005), indica que, desde 1996 al presente, se han producidos explosiones vulcanianas, como la de 1997, la cual estuvo precedida por una serie de sismos, una columna eruptiva de 8 km de altura dispersada hacia la Ciudad de México y lahares que llegaron a 12 km hasta el poblado de Santiago Xalitzintla. Entre 1997 y 2000 nuevas explosiones tipo vulcaniana; en el 2001, se produjo un flujo piroclástico rico en escoria, y lahares rebasaron la magnitud de la ocurrida de 1919 a 1927.

Volcán Puracé, Colombia (1440, 1540, 1810, 1812, 1814, 1833, 1855, 1860, 1977, 1990 cal AD). Monsalve y Pulgarín (1993) plantean que este volcán tiene una actividad de tipo explosivo, dando una gran variedad de productos, tanto de flujo como de caída; entre los primeros predominan los flujos de ceniza y escoria y de ceniza y bloques; entre los segundos, las cenizas y los proyectiles balísticos. Dicha actividad ha sido reportada a partir de 1801 y se han descrito desde 1827 al menos 15 erupciones históricas bien documentadas, que han causado daños materiales y pérdida de vidas; la última de ellas ocurrió en marzo de 1977.

Espinosa (2001) nos refiere la actividad volcánica más importante que ha tenido El Puracé, en 1849 y 1869. Para la de 1849, resumiendo todos los escritos a cerca del evento, indica que la cima del cono se destruyó debido a una fuerte explosión seguida de una erupción de barro, cenizas y otras sustancias, y se abrió un cráter de 100 m de diámetro, del cual brotó constantemente, como en el Vesubio, una espesa humareda. Las aldeas de Puracé, Tambo, Coconuco y San Isidro, y la mayor parte de las casas de la comarca, quedaron medio sepultadas, y por poco la ciudad de Popayán, dista 27 km del Puracé.

La actividad de 1869 fue relatada así, a la madrugada, hizo una fuerte explosión que ocasionó una gigantesca columna de vapor y cenizas dispersa en todas direcciones, con cargas eléctricas que la iluminaban. Los ríos, cuyas vertientes nacen del Puracé, salieron de madre, acrecidos por el lodo y el agua de la nieve fundida. Estas crecientes unidas en el río Cauca, lo

convirtieron en una corriente devastadora que inundó praderas y arrolló sembrados. Sus aguas sulfurosas causaron la muerte de todos los animales habitantes de este caudaloso río, y se difundió una peste mortífera en todas las comarcas ribereñas. Los puentes de los ríos Anambío y Vinagre quedaron todos destruidos, y los campos cubiertos de cenizas. En 1878, una pequeña erupción desparramo cenizas finas sobre Popayán y territorios vecinos.

En 1885, cuando, según recuerdos de los habitantes, una explosión catastrófica del Puracé, acompañada por un sismo (mató muchas personas y destruyó muchas casas en la región). También se registró actividad en 1899, a principios del siglo XX, en particular, en 1907, se registró una detonación violenta acompañada de una columna de cenizas y gases de prodigiosa altura que se dirigió hacia el oriente. Continúo esta actividad de manera intermitente hasta 1977.

Volcán Galeras, Colombia (1500, 1580, 1641, 1833, 1925, 1936, 1992, cal AD).

De acuerdo con Espinosa (2001), para este volcán se registran erupciones con VEI 5 que ocurrieron en 1580 y 1936. Este último evento, fue observado en Pasto y en varias poblaciones. Otras erupciones con un VEI 4 ocurrieron en 1500, 1641, 1833 y 1925. Entre 1989 y 1995, el volcán entró en un nuevo ciclo de actividad. Entre esos eventos se destaca el 1992, sentido muy fuerte en Pasto, Genoy y Nariño, y de 1993, de características similares; este último causó la muerte a nueve personas, entre ellas seis científicos unos días después tuvo lugar una erupción más importante que todas las anteriores del ciclo.

Cepeda (2020) muestra que la actividad del volcán ha sido predominantemente vulcaniana caracterizada por explosiones súbitas, como resultado de la respuesta frágil del taponamiento por domos y presión de gases magmáticos. Ascenso episódico cuasi permanente de magma que se ubica en superficie rellenando cráteres preexistentes y taponando el conducto volcánico. Las erupciones en el lapso 1863-1869, pudieron ser del orden de $1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$; mientras que las presentadas entre 1690-1736 pudieron producir $1,45 \times 10^6 \text{ m}^3$ de piroclastos de caída, para un total mínimo del orden de $4,35 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Guagua Pichincha-Complejo volcánico Pichincha, Ecuador (1582, 1660 cal AD).

Este volcán, de tipo explosivo, ha producido cuatro erupciones plinianas durante los 2000 últimos años. Desde 1660, última erupción de este tipo, este no se ha manifestado sino a través de una actividad de carácter freático marcada por modestas explosiones como en 1982 y 1993 (En: <https://journals.openedition.org/bifea/2290?lang=en#tocto1n1>). La primera vez que se hicieron sonar las campanas en la América hispana con el objeto de exorcizar una erupción explosiva fue el 14 de julio de 1582 en Quito, debido a la actividad vulcaniana del

Pichincha (En: <https://www.igepn.edu.ec/guagua-pichincha>). Estupiñán (1998), referencia la erupción volcánica del Pichincha el 24 de octubre de 1660, que se combinó con un terremoto regional generando un derrumbe en el volcán Sincholagua. De estas nubes (que se formaron en el aire y oscureció el sol) cayó mucha piedra pómez y ceniza y todo se oscureció.

Volcán Tambora, Indonesia (1815 cal AD). Scoott y Anchukaitis, (2015) indican que el 10 de abril de 1815, el Monte Tambora entró en erupción enviando “tres columnas de llamas” desde el interior sobre Sumbawa, Indonesia. 50 km³ de roca se habían convertido en vapor. Según los cálculos, 71000 personas en Indonesia habían muerto y aproximadamente 60Mt de azufre habían sido inyectados en la estratosfera. En términos de carga atmosférica total, Tambora se ubica como el tercer volcán con un evento volcánico de tal magnitud de los últimos 1500 años, eclipsado sólo por las erupciones en 1257 del volcán Samalas y en 1453 por el volcán Kuwae. El brillante sol rojo, morado y naranja, visto en Londres durante los siguientes verano y otoño fueron entre los primeros signos los efectos de esta erupción que se extendió mucho más allá del Indias Orientales Holandesas. El año 1816 fue decretado como el “Año Sin verano”.

Vergara (2014), divide el evento eruptivo en dos fases: 1) produjo cuatro depósitos de caída de tefra con columnas eruptivas plinianas de hasta 43 km de altura, y 2) generó grandes flujos piroclásticos, oleadas y caída de ceniza coignimbrítica, con la generación de una gran caldera de 6 km de diámetro y 1 km de profundidad.

Volcán Krakatoa, Indonesia (1883 cal AD). Vinas (2024), el autor indica que, en 1883, el volcán Krakatoa, ocasionó la mayor de las explosiones que desató una energía de 350 Megatonnes, 23.000 veces más poderosa que la bomba atómica de Hiroshima. La onda explosiva fue percibida en un 10% del planeta, viajando hasta la isla de Madagascar y Australia (una distancia aproximada entre ambas es de 7600 km). Tres años después, observadores de todo el mundo describían los tenues colores que podían verse durante el crepúsculo y el alba, ocasionados por la refracción de los rayos solares en las partículas en suspensión. (En: <https://www.divulgameteo.es/fotos/misarticulos/Violenta-erupci%C3%B3n-Krakatoa.pdf>; Artículo publicado originalmente en www.tiempo.com).

Volcán Irazú, Costa Rica (1964 cal AD). Alvarado et al., (2021), El Irazú posee un registro de depósitos de tefras, coladas de lava, lahares y avalanchas de escombros de los últimos 50 Ka, así como erupciones históricas (1723-1724, 1917-1921, 1924, 1928-1930, 1933, 1939-1940, 1963-1965), freatomagmáticas,

estrombolianas y freáticas. La frecuencia de las erupciones en los últimos 2500 años, las mayores erupciones han sido en 1963, 1964 y 1965 que ocasionaron efectos negativos directos sobre la población y la economía.

Volcán Arenal, Costa Rica (1968 cal AD). Alvarado et al., (2023), indican que este volcán se mantuvo eruptivamente activo por espacio de 42 años, (coladas de lava y explosiones menores entre 1968 y 2010) y que tiene un registro eruptivo de grandes sucesos en los últimos 7000 años. Su actividad es tanto estromboliana como vulcaniana, lo que lo hacen merecedor de ser uno de los más peligrosos de Costa Rica.

Volcán Monte Pinatubo, Filipinas (1991 cal AD). De Guzmán (2004), describe la erupción de 1991, como una de las más fuertes en la historia de la humanidad, en ella se expulsaron materiales volcánicos masivos de más de una milla cúbica como una nube de ceniza volcánica que se elevó tan alto como 22 millas en el aire y de más de 300 millas de ancho, convirtiéndose en día en noche en Luzón Central. A menor altitud, la ceniza fue arrastrada por todas partes coincidiendo con la dirección de los vientos de un tifón. En altitudes más altas, la ceniza fue arrastrado hacia el suroeste. Cenizas volcánicas y guijarros espumosos cubrían el campo; cenizas cayeron hasta el océano Índico. Los satélites siguieron la trayectoria de estas, alrededor del mundo. Casi 20 millones de toneladas de azufre y dióxido de carbono fueron inyectados en la estratosfera y dispersados por todo el mundo, provocando que la temperatura global cayera temporalmente en 5°C entre 1991 y 1993. La erupción del Monte Pinatubo fue considerada la erupción volcánica más grande del mundo del siglo y afectó una zona densamente poblada.

Volcán Nevado del Huila, Colombia (2007 cal AD). Espinosa (2001), enseña que la actividad de este volcán entre 1550 y la actualidad ha sido moderada. La única fase eruptiva, según las descripciones, sería la de 1550-1560; en los demás informes solo se puede admitir actividad fumarólica. Pulgarín et al., (1996 y 2007) y Ariza (2006), dicen que las erupciones ocurridas en 2007 son las primeras que se registran. De acuerdo con el registro geológico, los escenarios eruptivos posibles podrían ser flujos de lava (fisurales) o domos y generación de nuevos lahares.

1.4 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).

La Zona de Vida del sitio es Bosque Seco Tropical (Bs-T), de acuerdo con Espinal (1992), caracterizándose por contar con promedios de temperatura superiores a 24°C, precipitación total

anual entre 800 y 1266 mm y relaciones de evapotranspiración potencial entre 0,8 y 2,0 (Consultoría Colombiana S.A., 2017).

El Pantano se encuentra en la parte baja de la cuenca fluvial la cual se halla desarrollada sobre rocas sedimentarias de la Formación Amaga, Miembro Superior, en el Flanco oeste del Sinclinal de Ahuyamal, donde dominan, areniscas y arcillolitas de colores pardo a pardo rojizo, y espesos bancos de conglomerados con cantos redondeados heterométricos y heterogéneos soportados por una matriz areno limosa de color pardo rojizo. Existen zonas con regolitos de alteración de pocos metros de espesor desarrollados a partir de esas rocas sedimentarias (Flórez y Parra, 2023, 2024).

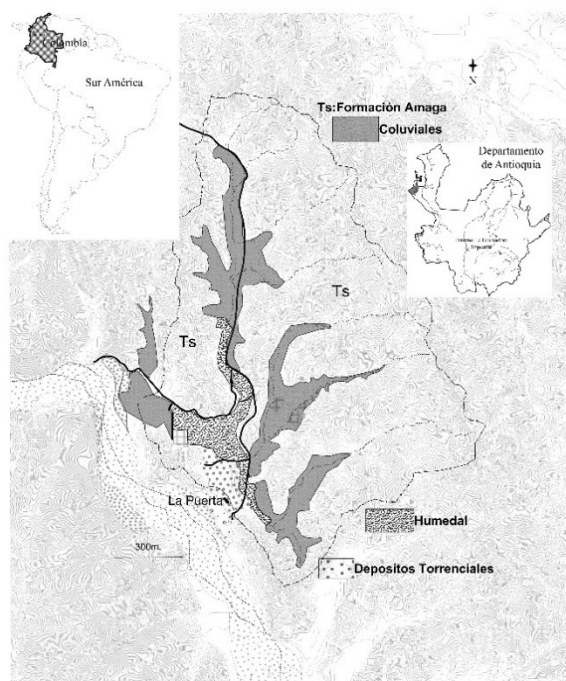


Figura 1. Localización del Pantano La Bramadora, Vereda La Puerta, Municipio de Sopetrán, Departamento de Antioquia, Colombia. Modificado de Flórez y Parra (2023).

2. MÉTODO

Con base en lo publicado por Flórez y Parra (2023), y Flórez et al. (2023, 2024), se resume la metodología que permitió obtener la información para el desarrollo de este artículo, la cual, parte de la toma de dos núcleos de sedimentos en el Pantano La Bramadora, uno de 10 m (N13) y otro de 9.5 m (N14), utilizando una Sonda Rusa de 50 cm. En laboratorio se refrigeraron hasta su descripción detallada y su segmentación al centímetro, su empaque y marcación. Allí el N14 fue abierto y descrito detalladamente, luego se seccionó al centímetro y cada rodaja se guardó en bolsas sello pack previamente marcadas para los análisis posteriores. Se tomaron fotografías de la perforación, de

las secciones de 50 cm de cada núcleo (19 secciones por núcleo para un total de 38 secciones).

Para la obtención de los datos geoquímicos, cada rodaja (950 en total), fue cuarteada. Una submuestra fue lavada en agua desionizada Tipo I, para separar la fracción más gruesa que 106 micrómetros y la fracción restante (líquido más sólido) fue leído en el Espectrómetro XRF - Epsilon1. Cada proceso fue debidamente documentado y fotografiado.

Para el análisis de componentes microscópicos cada centímetro fue dispersado en una mezcla de isopropanol-amoniaco, posteriormente se lavaron, y se eliminaron los componentes mayores de 106 μm . El residuo fino se preservó en una solución de etanol y luego se montó una alícuota de tres microlitros que fue fijada con Bálsamo de Canadá. El conteo de microcomponentes tanto orgánicos como minerales, se llevó hasta alcanzar 300 granos en varias transversales al azar. Se tomaron fotografías de todo el procedimiento. Se construyó la matriz de datos obteniéndose una matriz de microcomponentes 24 grupos (columnas) por 950 secciones centimétricas (filas). Se leyeron y fotografiaron en un microscopio petrográfico Olympus utilizando en todos los casos un objetivo de 40X.

Para obtener los datos cronológicos se realizaron tres dataciones radiométricas siguiendo lo recomendado por *BetaAnalytic*.

Para confirmar la presencia de criptotefra en los sedimentos del pantano, se tomaron aquellas muestras con indicios de fragmentos volcánicos en el conteo general o con valores geoquímicos anómalos y sus vecinas inmediatas y se trataron con H_2O_2 , grado reactivo, por 24 horas a 56°C, se lavaron, se montaron en Bálsamo de Canadá, se observaron al Microscopio petrográfico y al Microscopio de Barrido SEM, se fotografiaron, y los resultados más fiables se consignan en este artículo.

3. RESULTADOS

De acuerdo con Flórez (1987, 2000, 2004), los materiales volcánicos provenientes de las erupciones, conocidos como tefras o piroclastos (bloques, bombas, lapilli, cenizas volcánicas), están constituidas por un conjunto limitado de fragmentos que incluyen tanto materiales de los magmas jóvenes como de los materiales viejos y de fragmentos líticos cuando estos hacen parte de la estructura volcánica o como parte de xenolitos. Algunos investigadores (Walter (1971); Sparks et al. (1977); Fisher and Schmincke (1984); Heiken and Wohletz (1985), entre otros), citados por Flórez (1987), coinciden en que las cenizas volcánicas contienen vidrio volcánico (VV), fragmentos líticos (FL), fenocristales (F), y fragmentos de matriz (FM); estos últimos, se asimilan a lo que en particular Fisher and Schmincke (1984),

llaman líticos connatos o, a lo que en otros investigadores nombran como “agregados”.

En este contexto, se usa el término “criptotefras” para designar trazas de fragmentos volcánicos de tamaños pequeños, usualmente estudiados a 500 aumentos o mayores y cuya presencia no se halla en las muestras vecinas inmediatas. Dichos materiales han sido detectados por microscopía óptica de polarización y en algunas muestras con microscopía de Barrido SEM. Las evidencias petrográficas, SEM y geoquímicas encontradas, son descritas para cada nivel donde se confirmó la presencia de volcanismo. Especial cuidado se ha puesto en estudiar aquellos niveles que tienen presencia de erupciones históricas con fechas AD conocidas, debido a que ellas y en conjunto con las tasas de sedimentación y el fechamiento con radiocarbono sirvieron para fijar la cronología AD del núcleo hasta la profundidad 950 cm. El paleosuelo basal rico en anhídrida (903 a 950 cm), datado por radiocarbono arrojó una edad de 800 ± 30 , 1220-1291 cal AD, lo cual permitiría asimilar la criptotefras localizada a 915 cm, a la explosión volcánica del volcán Samalas, en Indonesia ocurrida en 1258 AD.

3.1 Presencia de criptotefras en el N14

En el N14, recuperado en el Pantano la Bramadora, se evidenciaron criptotefras en ciertas profundidades, las cuales están inmersas, en suelos, turbas y/o capas de limos y arcillas y paleosuelos. Se presentan algunas fotografías de criptotefras (vidrios volcánicos, Figura 2, y fragmentos de matriz, Figura 3), que muestran rasgos físicos como color, transparencia, forma, bordes, superficies, tamaño y el sitio o profundidad a la que se encontró, así como su asociación más probable a un evento volcánico ocurrido en el trópico. En la Figura 4, se indica la posición a profundidad en la que se prevaleció un vidrio volcánico o un fragmento de matriz y en la Tabla 1, se relacionan los eventos más concretos que tienen, posiblemente una estrecha relación con la actividad de un determinado volcán. La Figura 5, contiene la composición química elemental (Si, Fe, Al, Ca, Mg, Mn, S, Ti, Sr, en %, determinada por XRF) de los sitios en el N14, donde se detectaron criptotefras y que corresponden con posibles eventos volcánicos de gran magnitud ya documentados.

Las criptotefras llegaron al pantano, vía aérea, en la zona no existen Andisoles que las aportaran. No solo su presencia, también la química de estos elementos prueba su poder como marcador histórico de erupciones acaecidas en el trópico y que fueron preservadas en los sedimentos del N14 del Pantano La Bramadora. La descripción de las criptotefras se hace haciendo énfasis en algunos aspectos relevantes afines. Se resalta en negrilla, los sitios donde su presencia y su afinidad con un determinado evento volcánico no dejan duda.

HB29: La criptotefra está constituida por vidrio volcánico incoloro, con abundantes pits superficiales como cráteres, de diversos tamaños, lo cual crea bordes irregulares subredondeados. Posible relación con la erupción del volcán Puracé del 1990.

HB34 y HB35: La criptotefra está conformada tanto por vidrio volcánico como por fragmentos de matriz. Los vidrios volcánicos son incoloros, con abundantes pits superficiales como cráteres, de diversos tamaños, lo cual crea bordes extremadamente irregulares y profundos, redondeados. Los fragmentos de matriz son dos clases uno incoloro e isotrópico con minerales poligenéticos y, otro incoloro e isotrópico con agujas de rutilo. Podría corresponder a las erupciones del volcán Nevado de Ruiz de 1985 y 1984, respectivamente.

HB44: La criptotefra tiene tanto vidrio volcánico como fragmentos de matriz. El vidrio es incoloro, alargado, con aristas angulosas y textura fluidal; los fragmentos de matriz son incoloros y con minerales cogenéticos, especialmente de hiperstena, esta microtefra podría relacionarse con la explosión del volcán Puracé de 1977.

HB46: En esta criptotefra, las esquirlas de vidrio volcánico son de dos clases, uno isotrópico, con superficies irregulares que se asimilan a numerosas burbujas reventadas, los bordes son irregulares, profundizados formando curvaturas amplias, en los bordes se observan esquirlas angulosas como partes de burbujas. El otro es liso, ligeramente pardo con inclusiones fluidas oscuras como simulando una gotera alargada y estrecha en la parte final. Esta criptotefra podría asimilarse con la explosión del volcán Reventador en 1974.

HB54: La criptotefra está constituida por fragmentos de matriz isotrópicos, incoloro, con abundantes agujas de rutilo pseudo orientadas. Podría estar referida a la explosión del volcán Irazú, en Costa Rica en 1964.

HB145 y HB146: En ambos casos la criptotefra la conforman tanto vidrio volcánico como fragmentos de matriz; el vidrio volcánico es isotrópico, ligeramente pardo, con bordes irregulares y ligeramente redondeados, como si se tratará de burbujas reventadas, en su superficie se aprecia burbujas reventadas y angulosas. Los fragmentos de matriz son incoloros y con abundantes agujas de rutilo orientadas y apiñadas. Podrían corresponder a la actividad del volcán Nevado del Ruiz, 1845 y 1843, respectivamente.

HB150, HB159, HB163, HB171: La criptotefra contiene tanto vidrios volcánicos como fragmentos de matriz. Los vidrios son incoloros, con abundantes pits superficiales como cráteres, de diversos tamaños, lo cual crea bordes extremadamente irregulares y profundos, redondeados, son menos gruesos, como laminas, algunos tienen textura fluidal. Los fragmentos de matriz son

incolores, isotrópicos con agujas de rutilo. Esta posiblemente corresponda a la explosión del volcán Puracé de 1840, 1835, 1833 y 1829, respectivamente.

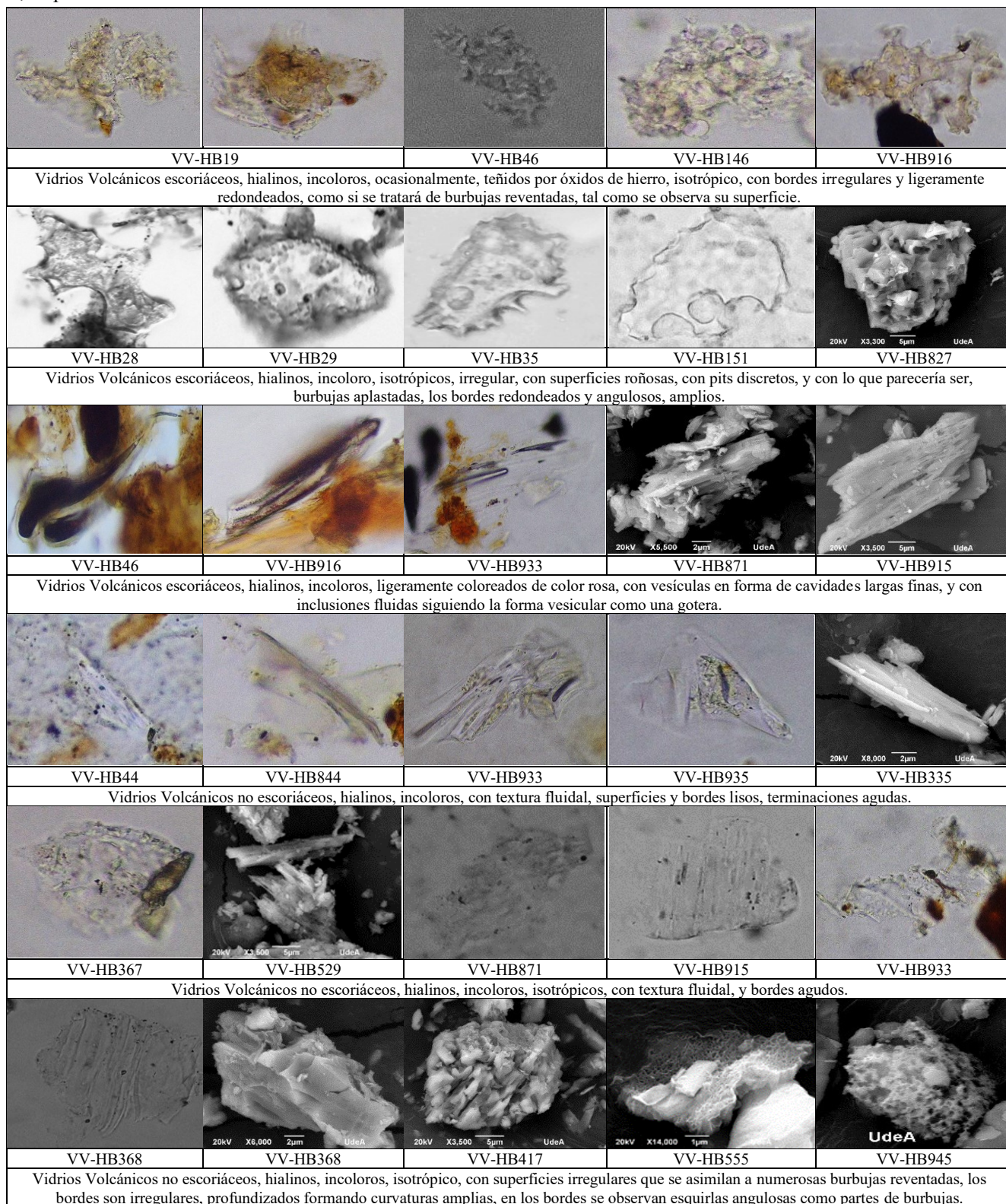


Figura 2. Criptotefras, tipo Vidrio Volcánico (VV), al Microscopio óptico (40X), y al microscopio de Barrido (SEM), presentes en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia

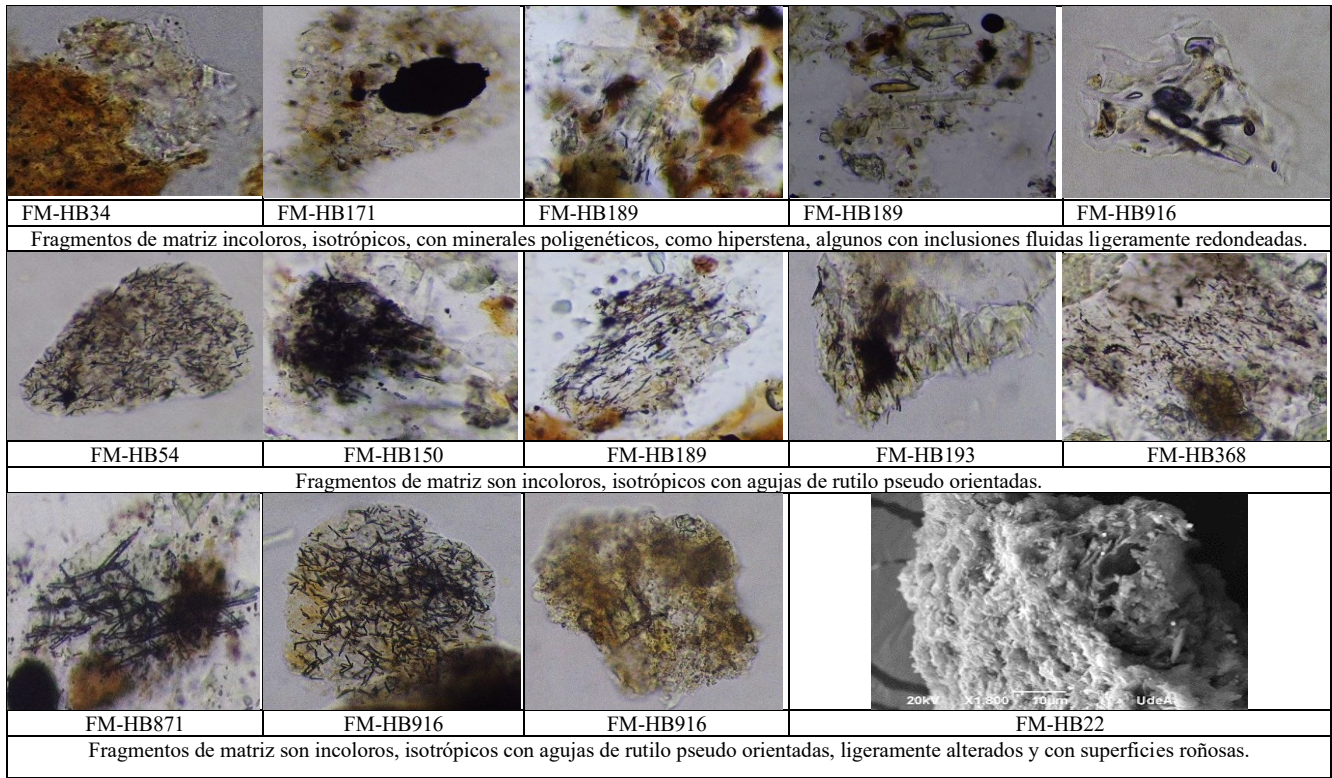


Figura 3. Criptotefra, tipo, Fragmentos de Matriz (FM), al Microscopio óptico y al microscopio de Barrido (SEM), presentes en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

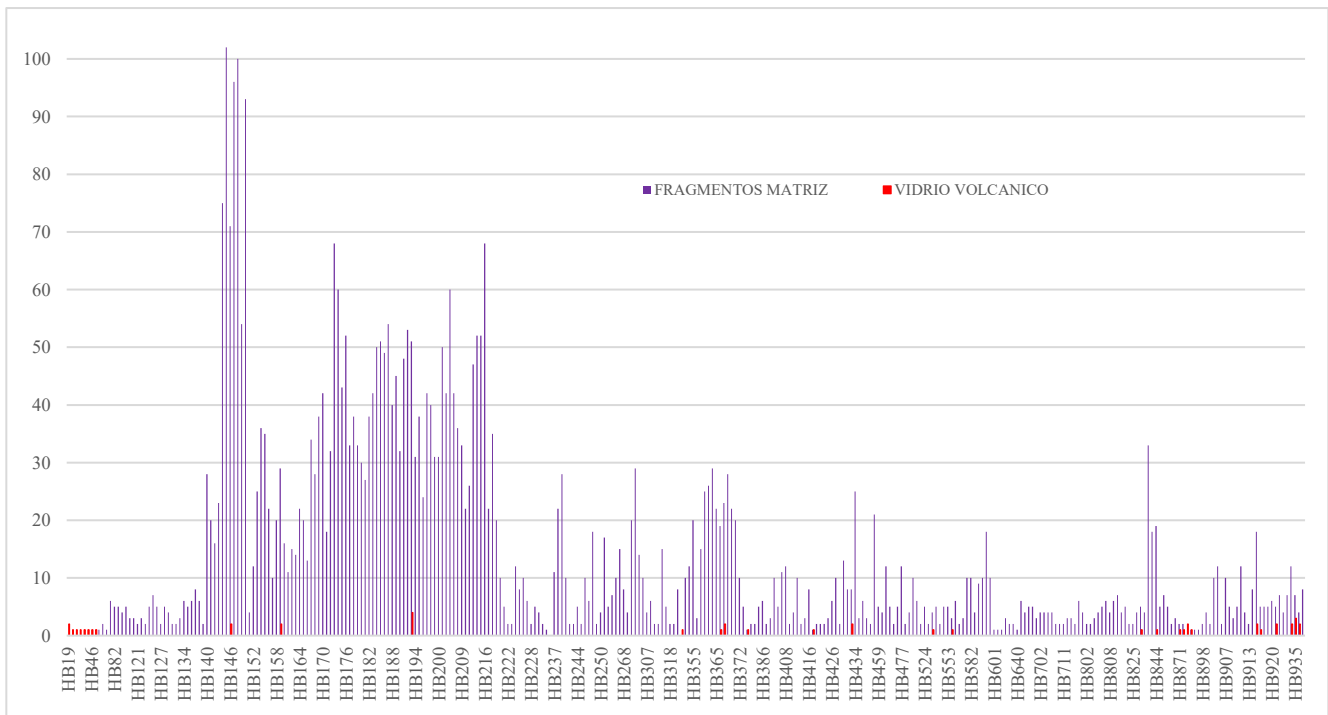


Figura 4. Sitios donde se encontró vidrio volcánico y/o fragmentos de matriz en el N14 del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. El eje Y conteo de granos en base 300, y el eje X, la profundidad en cm.

Tabla 1. Presencia de criptotefra (Fragmentos de Matriz y Vidrios Volcánicos, en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia y su relación con las erupciones volcánicas más fuertes y relevantes ocurridas entre 2022-1015 AC, en el trópico. (Información recopilada por los autores a partir de su propia investigación y de otros investigadores que se relacionan en la introducción).

| Profundidad (Cm) | Fragmentos de matriz | Vidrio Volcánico | Fecha - Eventos Entre 2022 A 1015 Ac |
|------------------|----------------------|------------------|--|
| HB1 | | | 2022: Recuperación N14 |
| HB19 | | 2 | 2007: V. del Huila, Colombia. V. Sangay, Ecuador. Evento Niña |
| HB28 | | 1 | 1991: V. Pinatubo, Filipinas |
| HB29 | | 1 | 1990: V. Puracé, Colombia. |
| HB33 | 2 | 1 | 1986: V. Nevado del Ruíz, Colombia |
| HB34 | 2 | 1 | 1985: V. Nevado del Ruíz, Colombia |
| HB35 | 3 | 1 | 1984: V. Nevado del Ruíz, Colombia. 1984: V. Villarrica, Chile |
| HB44 | 1 | | 1977: V. Puracé, Colombia. Nyragongo, El Congo. |
| HB46 | 1 | 1 | 1974: V. Reventador, Ecuador. |
| HB54 | 1 | | 1964: V. Irazú, Costa Rica. |
| HB109 | 4 | | 1883: V. Krakatoa, Indonesia |
| HB145 | 102 | | 1845: V. Nevado del Ruíz, Colombia |
| HB146 | 73 | | 1843: V. Nevado del Ruíz, Colombia |
| HB150 | 93 | | 1840: V. Puracé, Colombia. |
| HB159 | 31 | | 1835: V. Puracé, V. Nevado del Ruíz, Colombia. Cosigüina, Nicaragua. |
| HB163 | 14 | | 1833: V. Puracé, N. del Ruíz, Galeras, Colombia. V. Krakatoa, Indonesia. |
| HB171 | 18 | | 1829: V. Puracé, V. Nevado del Ruíz, Colombia. |
| HB189 | 45 | | 1815: V. Tambora, Indonesia - V Puracé, Colombia |
| HB190-HB191 | 48 | | 1814: V. Puracé, Colombia. |
| HB192-HB193 | 56 | | 1812: V. Puracé, Colombia. |
| HB194-HB195 | 38 | | 1810: V. Puracé, Colombia. |
| HB199 | 31 | | 1805: V. Nevado del Ruíz, Colombia. |
| HB332 | 8 | | 1670: V. Puracé, Colombia |
| HB335 | 2 | | 1660: V. Guagua, Pichincha, Ecuador |
| HB368 | 23 | 2 | 1600: V. Huaynaputina, V. Ubinas, Perú |
| HB378 | 2 | | 1595: V. Nevado del Ruíz, Colombia |
| HB436 | 10 | | 1540: V. Puracé, Colombia |
| HB439 | 2 | | 1527: V. Nevado del Ruíz, Colombia. |
| HB446 | | | 1521: V. Popocatepetl, México |
| HB539 | 1 | 1 | 1440: V. Puracé, Colombia |
| HB623-636 | | | 360±30 1482-1644 cal AD |
| HB850 | 20 | 2 | 1363: V. Popocatepetl, México |
| HB870-882 | | | 700±30 1340-1392 cal AD |
| HB903-HB908 | 12 | | Hiato: |
| HB915-950 | 5 | 1 | 800±30 1220-1291 cal AD: V. Samalas, Indonesia (1258 cal AD); 1259: V. El Chichón, México; 1245: V. Nevado del Ruíz, Colombia |
| HB950 | | | 1015-Base de N14 |

HB189: La microtefra está muy bien marcada por un valor extremo de Azufre típico de una erupción muy rica en aerosoles que se asocia al “año sin verano” de 1816. Se halla a este nivel, fragmentos de matriz, pero estos son de dos clases, uno incoloro, isotrópico con abundantes agujas de rutilo, orientadas o no; el otro, incoloro, isotrópico y con minerales cogenéticos especialmente de hiperstena, internamente posee inclusiones fluidas ligeramente redondeadas. La composición química de la muestra es: Si (19.285%), Al (7.932%), Fe (4.178%), Ca (2.097%), S (1.189%), y Mg (0.592%), también tiene Ti, Mn, Zn y Sr. En este nivel se reporta los valores más altos de elementos mayores, en especial S, de igual forma, la presencia del FM incoloro, con minerales poligenéticos e inclusiones fluidas, estos dos aspectos serían la huella dactilar del volcán Tambora, Indonesia, 1815 cal AD.

HB190 a HB195: La criptotefra podría corresponder con las erupciones del volcán Puracé en 1814, 1812 y 1810, respectivamente, está constituida por fragmentos de matriz incoloros, isotrópicos y con abundantes agujas de rutilo pseudo orientados.

HB335: La criptotefra la constituye esquirlas de vidrio volcánico, incoloro, isotrópico con textura fluidal, con terminaciones agudas y una pseudo forma “flecha”, podría corresponder a la explosión del volcán Guagua, Pichincha, Ecuador en 1660.

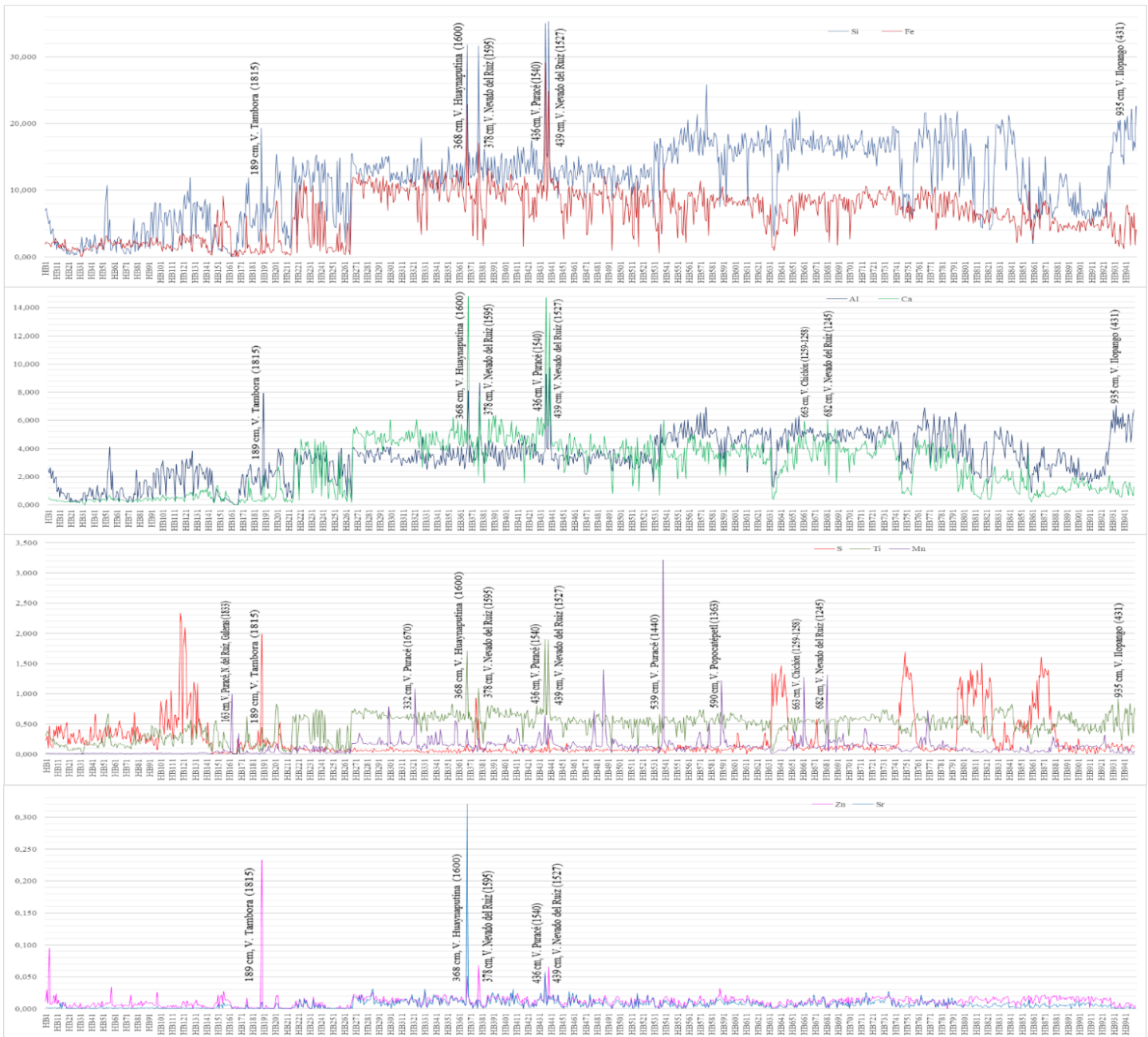


Figura 5. Composición elemental (Si, Fe, Al, Ca, Mg, S, Mn, Ti, Sr en % determinados por XRF), versus criptotefras, en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. En la figura se resalta la composición geoquímica en una determinada profundidad en el N14, que se asocia a eventos eruptivos volcánicos ocurridos en el mundo y en Colombia. La edad se determinó con base en dataciones radiométricas por ¹⁴C y la tasa de sedimentación, ella cual se expresa en años calendario (AC). El eje Y en porcentajes y el eje X, la profundidad en cm.

HB368: La criptotefra la constituye tanto vidrios volcánicos como fragmentos de matriz, los vidrios son esquirlas incoloras e isotrópicas con textura fluidal, con algunas terminaciones puntiagudas; los fragmentos de matriz son igualmente incoloros, isotrópicos y con abundantes agujas de rutilo con cierta orientación. La composición química, es: Si (31.796%), Fe (22.868%), Ca (14.786%), Al (8.113%), K (1.898%), Mg (1.553%), y S (0.166%). también tiene Zn y Sr. Presenta los

valores más altos en el N14, muy correlacionados con los minerales presentes y muy similar a lo documentado por Flórez (1987). Esta criptotefra se corresponde con la actividad volcánica del Huaynaputina, Perú, 1600 cal AD.

HB378: Criptotefra es esencialmente vidrios volcánicos de textura lamelar, bordes ligeramente redondeados y agudos, isotrópico e incoloro. La composición química, es: Si (31.612%), Fe (17.058%), Al (8.679%), Ca (7.721%), K (1.734%), Mg (1.128%), y S (0.588%); tiene también Zn. Valores porcentuales

muy altos. Esta criptotefra podría relacionarse con la actividad volcánica del Nevado del Ruiz, Colombia, 1595 cal AD.

HB436: La criptotefra contiene tanto vidrios volcánicos como fragmentos de matriz. Los vidrios son incoloros, isotrópicos, con abundantes pits superficiales como cráteres, de diversos tamaños, lo cual crea bordes extremadamente irregulares y profundos, redondeados, son menos gruesos, como laminas, algunos tienen textura fluidal. Los fragmentos de matriz son incoloros, isotrópicos con agujas de rutilo. Esta criptotefra, posiblemente corresponda a la explosión del volcán Puracé, Colombia, de 1540 cal AD. La composición química, es: Si (11.077%), Fe (8.673%), Ca (4.880%), Al (2.828%), K (0.765%), Mg (0.493%), y S (0.094%). Igualmente presenta también tiene Ti, Mn, Zn y Sr.

HB439: La criptotefra contiene vidrios volcánicos incoloros, isotrópicos, con textura fluidal, y bordes agudos. Esta criptotefra podría corresponder con la erupción del volcán Nevado del Ruiz, Colombia, 1527 cal AD. La composición química, es: Si (9.915%), Fe (8.564%), Ca (4.498%), Al (2.458%), K (0.544%), Mg (0.455%), y S (0.071%). Tiene además Zn y Sr.

HB446: Esta criptotefra contiene tanto vidrio volcánico como fragmentos de matriz. Los vidrios volcánicos de textura lamelar, bordes ligeramente redondeados y agudos, isotrópico e incoloro. Los fragmentos de matriz son incoloros, isotrópicos con agujas de rutilo. Esta criptotefra podría relacionarse con la erupción del volcán Popocatepetl, México, en 1363 cal AD. La composición química es: Si (17.173%), Al (5.186%), Fe (3.604%), Ca (2.364%), Mg (1.081%), K (0.781%), y S (0.083%), tiene además Mn, Ti, Sr.

HB663: Esta criptotefra contiene tanto vidrio volcánico como fragmentos de matriz. Los vidrios volcánicos de textura lamelar, bordes ligeramente redondeados y agudos, isotrópico e incoloro. Los fragmentos de matriz son incoloros, isotrópicos con agujas de rutilo. La criptotefra podría relacionarse a la erupción del volcán El Chichón, México, en 1259 cal AD. La composición química es: Si (16.804%), Al (5.184%), Fe (9.331%), Ca (5.935%), Mg (1.219%), K (0.638%), y S (0.063%). Además, se encontró Ti y Ca.

HB682: Esta criptotefra contiene tanto vidrio volcánico como fragmentos de matriz. Los vidrios volcánicos de textura lamelar, bordes ligeramente redondeados y agudos, isotrópico e incoloro. Los fragmentos de matriz son incoloros, isotrópicos con agujas de rutilo. La criptotefra podría relacionarse con la erupción del volcán Nevado del Ruiz, Colombia, en 1245 cal AD. La composición química es: Si (18.046%), Al (4.992%), Fe (8.316%), Ca (6.072%), Mg (1.472%), K (0.839%), y S (0.101%).

HB827-HB844-HB871: En estas profundidades la criptotefra contiene tanto vidrios volcánicos como fragmentos de matriz. Los vidrios son incoloros, con abundantes pits superficiales como cráteres, de diversos tamaños, lo cual crea bordes extremadamente irregulares y profundos, redondeados, son menos gruesos, como laminas, algunos tienen textura fluidal. Los fragmentos de matriz son incoloros, isotrópicos con agujas de rutilo. Pese a que hay criptotefras no se encontró información sobre erupciones volcánicas que pudieran corresponder a estas.

HB915, HB916: Esta microtefra es algo especial, ya que está constituida por dos tipos de vidrio volcánico y dos tipos de fragmentos de matriz. Los vidrios volcánicos son incoloros, isotrópicos con abundantes pits superficiales como cráteres, de diversos tamaños, lo cual crea bordes extremadamente irregulares y profundos, redondeados; el otro es incoloro e isotrópico pero la textura es fluidal, con superficies y bordes lisos, internamente presenta inclusiones fluidas, alargadas en la misma dirección de la fluidez pueden o no ser ligeramente de color rosa pálido.

Los fragmentos de matriz pueden ser incoloros, isotrópicos y con abundantes agujas de rutilo, orientadas o no y el otro incoloro, isotrópico y con minerales poligenéticos especialmente de hiperstena. Algunas de estas criptotefra, en especial la encontrada en HB916, podrían estar relacionada con la erupción del volcán Monte Paektu en 946 cal AD.

La composición química es: HB915: Si (5.993%), Fe (4.722%), Al (1.869%), Ca (1.154%), K (0.896%), S (0.0556%), y Mg (0.0%) y HB916: Si (8.267%), Fe (4.965%), Al (2.566%), Ca (1.182%), K (1.075%), Mg (0.101%), y S (0.002%). La composición elemental en ambas es muy similar y promedia con respecto a todo el núcleo. Se resalta el tipo de microtefra reportada en HB916HB935: La criptotefra la constituye tanto vidrios volcánicos como fragmentos de matriz, los vidrios son esquivras incoloras e isotrópicas con textura fluidal, con algunas terminaciones puntiagudas. Los fragmentos de matriz pueden ser incoloros, isotrópicos y con abundantes agujas de rutilo, orientadas o no. La composición química, es: Si (18.966%), Al (5.678%), Fe (1.536%), K (1.453%), Ca (0.732%), Mg (0.335%), y S (0.159%). Tiene además Ti y Mn. Podrían estar relacionada con la erupción del volcán Ilopango, El Salvador 431 cal AD.

De la Figura 4, se destacan varios rangos que evidencian comportamientos diversos en la cantidad y distribución de las criptotefra, así: Entre 28 y 46 cm, prácticamente dominan esquivras de VV, pudiéndose asimilar estas en 28 cm a la erupción del Pinatubo en 1991 cal AD, y en 46 cm, la del Reventador en 1974 cal AD. Entre este rango se registra la actividad de los volcanes colombianos, como la del Nevado del Ruiz en 1985 cal AD en 35 cm, aunque es más alta la presencia de los FM, la criptotefra como tal, es relativamente escasa. De 47-139 cm, se

presenta una ciclicidad de tres pulsos muy pequeños de FM, 54 cm podría ser la explosión del Irazú en 1964 cal AD y en 109 cm, la explosión del Krakatoa en 1883 cal AD.

Entre 140-218 cm, se registra, por lo menos, cinco pulsos cíclicos dominados por FM con valores relativamente al-tos en los siguientes rangos, a los cuales, se asocia un evento volcánico, así: 140-148 cm, la erupción del Ruiz de 1845 cal AD, y entre 151-182 cm, las del Puracé en 1840, 1835, 1833, y 1829 cal AD. De 219-377 cm, se observa, por lo me-nos cinco pulsos cíclicos e irregulares. Se resaltan los puntos: 335 cm actividad del Guagua, Pichincha (1660 AC); en 368 cm, la del Nevado del Ruíz (1605 AC), y en 368 cm, la del Huaynaputina (1600 AC).

Entre 378-950 cm, en promedio, el contenido es más bajo que el anterior, pero es más irregular, se destacan los pun-tos en 378 cm, del Nevado del Ruíz (1595 cal AD); 433 cm, Puracé (1540 cal AD); 439 cm, Nevado del Ruíz (1527 cal AD); a 446 cm, el Popocatépetl (1521 cal AD); en 529 cm, el Puracé (1440 cal AD); a 555 cm, el Popocatépetl (1363 cal AD); 706 cm, El Chichón (1259 cal AD); y en 720 cm, el Nevado del Ruíz (1245 cal AD). De 827-902 cm, se registran microtefras que podrían relacionarse con un volcanismo asociado a los eclipses lunares, sin embargo, no se precisa a cuáles volcanes, solo hace parte de crónicas, dicho volcanismo se presentó en 1229, 1172 y 1110 cal AD. Entre 903-908 cm, un hiato quizás de varios centenares de años.

La Figura 5, muestra como algunos de los elementos químicos leídos por XRF (Flórez y Parra, 2023), tales como Si, Fe, Al, Ca, S, Ti, Mn, Zn y Sr, entre otros, permiten caracterizar los sedimentos, suelos o paleosuelos que contienen las criptotefras que llegaron al pantano, vía aérea, ya que en la zona de influencia no existen Andosoles que hubieran aportado tales

materiales. No solo su presencia sino la química de los materiales que las contiene prueba su poder como marcador histórico de erupciones acaecidas en el trópico y que son preservadas en el N14 del Pantano La Bramadora.

3.2 Criptotefras, Pérdidas por Ignición (LOI), Si/Mg, Ca/Mg, y Azufre (S)

La Figura 6, resalta el comportamiento del LOI, de los cocientes Si/Mg, Ca/Mg y del S, y permiten explicar de manera sencilla la relación entre sí y su acople con la criptotefra hallada en la profundidad indicada en la gráfica.

Los mayores porcentajes del LOI, en el N14, se concentran en el techo, entre HB1 y HB109 cm, coincidiendo con el suelo actual y un material turboso que lo subyace. En la base, entre HB844 y HB950 cm, concuerda con dos paleosuelos separados por un hiato entre HB902 y HB908 cm, luego otro paleosuelo aridico hasta HB950 cm.

Valores altos del LOI se relacionan con climas cálidos-secos, que favorecen la formación de un pantano arbóreo o suelos terrestres, como los observados entre HB1 y HB109 cm, con un valor promedio de 58.23%; en este tramo sobresales tres valores muy altos de 75% en HB29, HB44 y HB46 cm. Valores bajos del LOI coinciden con climas cálidos-húmedos, que consienten el desarrollo de un pantano de hierbas, sin déficit de agua, desarrollado entre HB145 y HB827 cm, que tiene un valor medio de 6.88%, se destacan los valores más bajos en HB171, HB335 y HB372 cm (6.667%, para el primero y 9.091%, para los dos últimos). En la base, entre HB844 y HB950 cm, se observan valores ligeramente más altos que en el tramo anterior pero no tanto como en el techo, el valor promedio es de 31.83%.

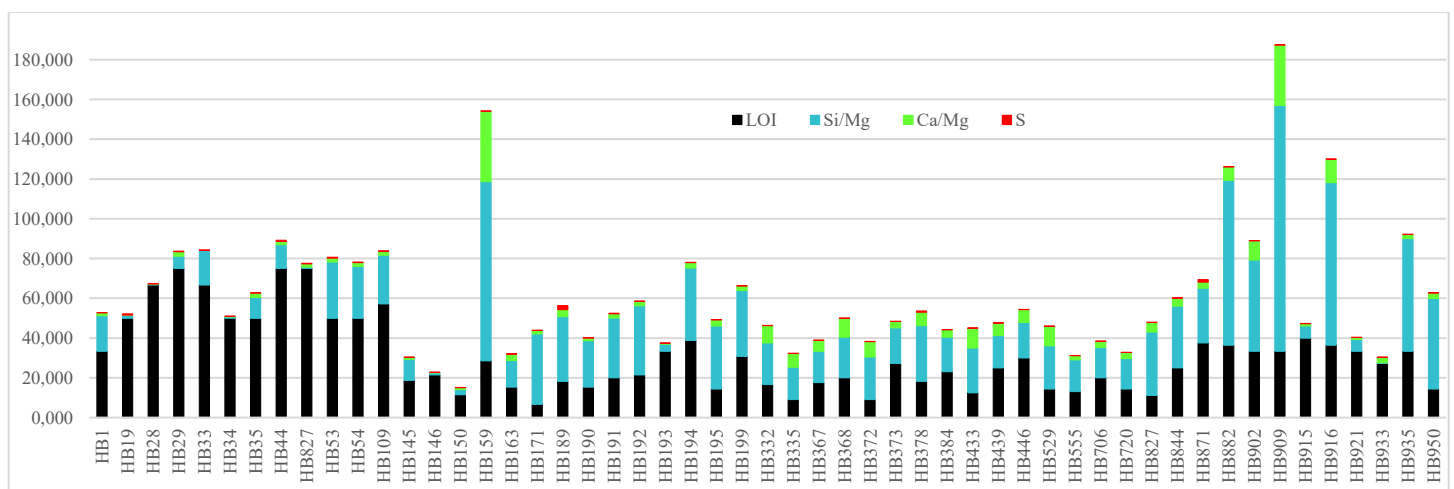


Figura 6. Relación de la criptotefra relacionadas con las Perdidas por Ignición (LOI), los cocientes Ca/Mg y Si/Mg, y el Azufre (S), en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. El eje Y, relaciones elementales en porcentajes y el eje X, la profundidad en cm.

La relación Si/Mg, muestra un comportamiento inverso al del LOI, donde aumenta Si/Mg, baja el LOI y en sentido contrario, lo cual se hace más notable en el techo y base del N14; en el techo los valores más bajos están en HB28, HB34 y HB46 (0.331%, 0.638% y 0.466%, respectivamente. A partir de HB159 y hasta HB827, los valores son relativamente constantes y ligeramente más altos que los del LOI, el valor promedio es de 42,16%. las mayores concentraciones de esta relación se presentan en HB159 cm (90,14%) y HB909 cm (123,67%), en ambos casos coincide con un valor alto en la relación Ca/Mg, para el primero se relaciona con la erupción de los volcanes Puracé y Nevado del Ruiz en 1835 AC; para el segundo se relaciona con el techo de un paleosuelo desarrollado bajo un clima de extrema aridez.

Entre HB145 y HB150 cm, los valores decaen, siendo los más bajos en HB171 y HB827 cm (13,36% y 31,28%, respectivamente), el valor promedio es de 23,06%, los valores son fluctuantes, por lo menos casi tres veces más altos que los del LOI, muestran una pseudo ciclicidad; en HB827 cm, aumentan con respecto al LOI. En el tramo de la base, entre HB844 y HB950 cm, se observan valores mucho más altos que en los dos tramos anteriores, siendo el valor medio de 56,77%, el valor más alto está en HB909 cm (123,67%) y el más bajo en HB933 cm (0,36%). La relación Si/Mg, influencia más el desarrollo de un pantano arbóreo.

La relación Ca/Mg, presenta un comportamiento ligeramente diferente, tanto al LOI como a la relación Si/Mg, solo en esta última, se observa una concordancia en valores altos en HB159 cm (35,29%) y HB909 cm (30,436%), coincidiendo con lo expresado para la relación Si/Mg, en iguales profundidades.

El comportamiento en el techo, tramo entre HB1 y HB150 cm, el valor promedio es de 1,18%, en HB28 cm es 0,0% y es el valor más bajo de todo el tramo. Entre HB159 y HB909 cm en promedio el valor es de 4,81% y en la base entre HB915 y HB950 cm es de 3,54%. Por lo que se observa, la relación Ca/Mg, es mucho más estable y altamente relacionada con el desarrollo de un pantano de hierbas.

Los valores del S son muy bajos en todo el núcleo, un poco más alto en la base y en el techo concordando con un origen pedogenético. En ciertas profundidades las concentraciones son relativamente más como en HB189 cm (1,99%), relacionado, con el volcanismo del Tambora y del Puracé en 1815 AC; en HB378 cm (0,59%), relacionado con la actividad volcánica del Nevado del Ruiz, Colombia, 1595 AD; en HB871 cm (1,26%), este alto valor estaría asociado con actividad pedogenética como en los demás casos.

4. DISCUSIÓN

Pocos autores presentan descripciones precisas sobre las características de las criptotefras, siendo la evidencia por excelencia las esquirlas de vidrio volcánico y en algunos casos sus características morfológicas, geoquímicas o el índice de refracción; sin embargo, en muchas de las grandes explosiones (VEI mayores que 4) faltan detalles en las esquirlas que permitirían mejorar las correlaciones en los depósitos de ellas pero a miles de kilómetros de sus fuentes, y por su-puesto, datos sobre los aerosoles volcánicos al momento de la erupción apenas empiezan a ser conocidos en pocas explosiones del Siglo 20.

Normalmente, en las criptotefras se omiten también descripciones de otros fragmentos volcánicos que podrían ayudar en su correlación a grandes distancias. Por ejemplo, Hoult et al., (2022) y Brown et al., (2023), describen los agregados de cenizas de las erupciones del volcán Ilopango (Salvador) indicando que presentan una pared de burbujas vítreas y fragmentos de cristales derivados de un magma riodacítico.

Las evidencias de criptotefras descritas para el núcleo N14, son de tamaños menores que 104 μm ., e incluyen otras evidencias como fragmentos de origen volcánico, esquirlas de vidrios volcánicos y marcadores geoquímicos y como era de esperar, algunas explosiones están mejor marcadas por un elemento, como el caso del pico máximo de Azufre (S) correspondiente a la explosión del Tambora (1815), mientras que, en otras, son los fragmentos volcánicos los que marcan el evento volcánico.

Es un hecho la presencia de criptotefras, preservadas en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia, el N13 y N14, como “huellas dactilares” del volcanismo tropical del último milenio y también el gran valor que tienen algunas de ellas como marcadores seguros de tiempo en los núcleos de sedimentos que permiten asignarle un fechamiento en años corrientes (*años domini*, AD).

Esta característica temporal de las criptotefras, es especialmente útil para asignar fechamiento calendario a erupciones ocurridas previas al año 1500 cuando se carece de crónicas históricas. Así que N14, es el primer registro sedimentario de Colombia con una tasa de sedimentación muy alta del orden de un centímetro por año y estudiado continuamente a esta escala que contiene información valiosa y relevante sobre erupciones volcánicas poderosas que han cubierto varios países en la región e incluso globales que han afectado a la humanidad, los ecosistemas y el clima.

Lograr el objetivo en pleno de que las criptotefras sean las huellas dactilares del volcanismo del último milenio en el trópico y su valor como marcadores del tiempo AD, en el Pantano La Bramadora, requiere involucrar geoquímica más precisa que lo haga posible, como p.e., trabajar a nivel de varvas, al milímetro, se puede hacer porque los sedimentos son laminados, pero se requiere de un equipo de perfilación por micro fluorescencia de rayos X (XRF). Para precisar mejor las edades planteadas de los eventos volcánicos, es necesario realizar más dataciones radiométricas por ^{14}C y así poder ajustar las tasas de sedimentación y los años calendario (AD). En el caso de las criptotefras se requiere más horas de micro-copia SEM para caracterizar y documentar mejor los fragmentos volcánicos y las esquirilas de vidrio.

5. CONCLUSIONES

Los sedimentos del Pantano La Bramadora guardan evidencias de eventos globales y locales volcánicos, que se pueden visualizar a través de la presencia de “criptotefras” (pequeñas esquirilas de vidrio volcánico y/o fragmentos de matriz cuyos tamaños menores a $104\ \mu\text{m}$). Estas son huellas dactilares del volcanismo tropical ocurrido en el último milenio.

La criptotefra contiene tanto vidrios volcánicos como fragmentos de matriz o fragmentos volcánicos. Los vidrios volcánicos, pueden ser coloreados o incoloros, escoriáceos o no, amorfos incoloros o levemente coloreados (pardo o rosa), pueden o no tener inclusiones fluidos adherencias. Los fragmentos de matriz hacen parte del sistema magmático rápidamente enfriado, razón por la cual se producen numerosos sitios de nucleación de cristales que estuvieron limitados por su tamaño y, produjeron numerosos microlitos y crisolitos. Son isotrópicos; amorfos pueden tener grietas superficiales o profundas, “pits” y estrías., pueden ser láminas o sólidos gruesos de varias μm de espesor. Estos fueron dominantes en todo el N14. Sin embargo, aunque la cantidad de VV, fue menor, su presencia fue determinante en la asignación de un evento volcánico.

Los mayores porcentajes del LOI, en el N14, se concentran en el techo, coincidiendo con el suelo actual y un material turboso que lo subyace, y en la base, que posee dos paleosuelos separados por un hiato, ambos Aridisoles. Valores altos del LOI se relacionan con climas cálidos-secos, que favorecen la formación de un pantano arbóreo, tanto en el techo como en la base. Valores bajos del LOI, localizados en la parte media del N14, coinciden con climas cálidos-húmedos, que consienten el desarrollo de un pantano de hierbas, sin déficit de agua.

La relación Si/Mg, muestra un comportamiento inverso al del LOI, donde aumenta Si/Mg, baja el LOI y en sentido contrario, lo cual se hace más notable en el techo y base del N14; las mayores concentraciones de esta relación se presentan en HB159 cm y HB909 cm, para el primero relacionada con la erupción de los volcanes Puracé y Nevado del Ruiz en 1835 AC. Para el segundo se relaciona con el techo de un paleosuelo desarrollado bajo un clima de extrema aridez. Entre HB145 y HB150 cm, los valores decaen, son fluctuantes, y casi tres veces más altos que los del LOI, en ellos se observa una pseudo ciclicidad. Entre HB844 y HB950 cm, base del núcleo los valores son mucho más altos que en los dos tramos anteriores. Valores altos de Si/Mg, influencia el desarrollo de un pantano arbóreo.

La relación Ca/Mg, tiene un comportamiento ligeramente diferente, tanto al LOI como a la relación Si/Mg, solo en esta última, se observa una concordancia en valores altos en HB159 y HB909 cm, coincidiendo con lo expresado para la relación Si/Mg, en iguales profundidades. Esta relación Ca/Mg, es mucho más estable y altamente relacionada con el desarrollo de un pantano de hierbas.

Los valores del S son muy bajos en todo el núcleo, un poco más alto en la base y en el techo concordando con un origen pedogenético. En HB189 cm su valor es significativamente más alto (1,99%), permitiendo relacionarlo con la actividad del Tambora y del Puracé en 1815 AC, al igual que en HB378 cm (0,59%), relacionado con la actividad del Nevado del Ruiz, Colombia, 1595 AC; en HB871 cm (1,26%), este alto valor estaría asociado con actividad pedogenética como en los demás casos.

Finalmente, los picos o valores extremos en los elementos por XRF son muy valiosos como marcadores de criptotefras.

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, a los revisores del artículo y al Comité Editorial del Boletín Geológico por su interés en la calidad de la publicación.

REFERENCIAS

- Alessio Di R., et al. (2023). Cryptotephra in the marine sediment record of the Edisto Inlet, Ross Sea: Implications for the volcanology and tephrochronology of northern Victoria Land, Antarctica. *Quaternary Science Advances*. 10 (2023) 100079. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100079>
- Alvarado et al. (2021). Peligros Volcánicos Del Irazú, Costa Rica. Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). DOI:10.13140/RG.2.2.13642.44480
- Alvarado et al. (2023). Actualización del análisis del peligro volcánico del Arenal, costa rica. Instituto Costarricense de Electricidad. DOI:10.13140/RG.2.2.28921.65120
- Ariza, A. (2006). Retroceso de glaciales tropicales en los Andes Centrales de Colombia mediante imágenes Landsat. By laws of the Journal Editorial Board Polytechnic University of Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico. Accepted march 2006. Madrid: Universidad de Alcalá, Departamento de Geografía.
- Briffa K., Jones P., Schweingruber F., Osborn T. (1998) Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature* 393:450–455. <https://doi.org/10.1038/30943>
- Brown R., et al. (2023). Corrientes de densidad piroclástica ricas en agregados de ceniza de la erupción de Tierra Blanca Joven del año 431 d.C., caldera de Ilopango, El Salvador. *Revista de vulcanología e investigación geotérmica*. Volumen 439, julio 2023, 107845
- Bustos N.J. (1934). Estudio sobre la crisis volcánica de la cordillera de los Andes. Exploraciones aéreas sobre el Volcán Quizapu en erupción. Santiago De Chile. SOC. IMP. Y LIT. UNIVERSO. Ahumada 32. 1934.
- Campbell B. (2017). Los climas globales, la mega erupción del volcán Samalas (Indonesia) en 1257 y la crisis alimentaria inglesa de 1258 diciembre 2017. *Transacciones de la Royal Historical Society* 27:87-121. DOI:10.1017/S0080440117000056
- Cepeda B., et al. (1986): Algunas particularidades geoquímicas del macizo volcánico del Ruiz (Colombia). *Memorias Simposio Internacional sobre Neotectónica y Riesgos Volcánicos*. Revista CIAF 11:272-280. Santafé de Bogotá. Servicio Geológico Colombiano.
- Cook E., et al. (2023). Volcanism and the Greenland ice cores: A new tephrochronological framework for the last glacial-interglacial transition (LGIT) based on cryptotephra deposits in three ice cores. *Quaternary Science Reviews*. 292 (2022) 107596. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107596>
- Cottet J. (2020). Estratigrafía de eventos volcánicos basada en registros sedimentarios postglaciales en la zona de lag Epulafquen, Patagonia. Tesis de grado. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de ciencias Naturales y Museo. Argentina. 330p.
- De Guzman E.M. (2004). Eruption of Mount Pinatubo in the Philippines in June 1991. The nature and impact of the disaster Asian Disaster Reduction Center. Consultant (Philippines). 18p. En: https://www.adrc.asia/publications/recovery_reports/pdf/Pinatubo.pdf
- De Silva S. and Zielinski G. (1998). Influencia global de la erupción del Huaynaputina en el año 1600 d.C., Perú, junio de 1998. *Naturaleza*. 393(6684):455-458. DOI:10.1038/30948.
- Eslava, J.A. (1985). Consideraciones sobre los aspectos meteorológicos y efectos relacionados con la dispersión de fragmentos y gases emitidos por el volcán Arenas del Nevado del Ruiz el 13 de noviembre de 1985. *Geología Colombiana*. 14:165-173. Santafé de Bogotá.
- Eslava, J.A. (1987). Dispersión de las cenizas emitidas por el Volcán Nevado del Ruiz (Colombia) durante las erupciones de 1595 y 1985. Pronóstico de la dispersión en caso de eventos futuros. *Anales del II Congreso Interamericano de Meteorología y V Argentino de Meteorología*, p.16.5.1-16.5.5. Centro Argentino de Meteorólogos. Buenos Aires.
- Eslava, J. A. (1994). Cambios atmosféricos asociado a la erupción del Nevado del Ruiz. *Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Colección Jorge Álvarez Lleras No. 4. Santa Fe de Bogotá. Ed. Guadalupe, 1994. 90p.
- Espinal, L.S. (1992). *Geografía ecológica de Antioquia*. Zonas de vida. Editorial Lealón, Medellín. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias y Ciencias Agropecuarias. 146pp. Red Scielo. http://www.scielo.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000127&pid=S0123-3068200700010001100008&lng=es
- Espinosa B. A. (2001). Erupciones históricas de los volcanes colombianos (1500-1995). *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Colección Jorge Álvarez Lleras No. 16. Edición cofinanciada por la Universidad del Quindío. ISBN: 958-9205-19-4 Obra completa. ISBN: 958-9205-43-7 Volumen. BOGOTA, D.C., COLOMBIA 2001.

- Espinosa, B. A. (1989b). Nube ardiente en el volcán Galeras, años 1930-1940. Informe no publicado, INGEOMINAS-Popayán, 10 p.
- Estupiñán T. (1998). Volcán Pichincha. Erupciones, destrucciones e invenciones, Quito, Ediciones del Banco Central de Ecuador, 1998, p. 176.
- Fiacco R. et al. (1993). Características y posible origen de una capa de ceniza volcánica de 1479 d.C. en un núcleo de hielo de Groenlandia, mayo de 1993. *Investigación Cuaternaria* 39(3):267-273. DOI:10.1006/qres.1993.1033
- Flórez M.T., y Parra L.N. (2024). Indicadores de la paleo precipitación interanual preservada en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico*, 51(1), 2024. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.51.1.2024.726>
- Flórez M.T., y Parra L.N. (2023). 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>
- Flórez M.T., Parra L.N., Abril G. y Monsalve C. (2023). Sensores paleoclimáticos del último milenio preservados en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Colombia. *Boletín Geológico*, 50(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.50.2.2023.711>
- Flórez M.T., Parra, L.N. y Calderón J.A., (2023). Evidencias de eventos extremos de precipitación y de explosiones volcánicas entre 1455-2022, A.D, en el humedal la Bramadora, Antioquia, Colombia. *Boletín De Ciencias De La Tierra*, 53, pp. 9 - 24. DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct.n53.108060>
- Flórez M.T., (2004). Meteorización experimental de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos. Tesis PhD. Universidad Nacional De Colombia, Sede Palmira. 300p.
- Flórez M.T., (2000). Génesis de suelos y paleosuelos ándicos a partir del estudio de pedocomponentes. Tesis De Maestría. Universidad Nacional De Colombia. Medellín. 190p.
- Flórez M.T., (1987). Litoestratigrafía y génesis de las tefras de la Unión, Sonsón y San Diego. Tesis Pregrado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 180p.
- Hoult H., Brown R.J., Van Eaton A., and Hernández W., (2022). Growth of complex volcanic ash aggregates in the Tierra Blanca Joven eruption of Ilopango Caldera, El Salvador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 431 (2022)107670 <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107670>
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. INGEMMET, (2021). Informe Técnico N° A7184 Patrimonio geológico asociado a la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. Departamento Mosquera, provincia General Sánchez Cerro, Distrito de Quinistaquillas, Perú.
- Kutterolf, S. et al. (2015). Bromine and chlorine emissions from Plinian eruptions along the Central American Volcanic Arc: From source to atmosphere. *Earth and Planetary Science Letters* 429 (2015) 234–246. www.elsevier.com/locate/epsl.
- Lowe, D. J.; Hunt, J. B. 2001. A summary of terminology used in tephra-related studies. In: hwnigne, E.T.; Raynal, J-P. (Eds), 'Tephra's: Chronology, Archaeology', CDERAD editeur, Gaudet. Les Dossiers de l'Archeo-Log is 1: 17-22
- Macías J. L., 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana Tomo LVII*, núm. 3, 2005, p. 379-424. Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Del. Coyoacán, 04510, México D. F. macias@geofisica.unam.mx. MEXICANA A.C. SOCIEDAD GEOLÓGICA. 1904. 2004.
- McLean D. et al. (2018). Integrating the Holocene tephrostratigraphy for East Asia using a high-resolution cryptotephra study from Lake Suigetsu (SG14 core), central Japan. *Quaternary Science Reviews* 183 (2018) 36e58. www.elsevier.com/locate/quascirev
- Monsalve B., y Pulgarín A., (1993). Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Puracé. *Revista Ingeominas*. No. 2. 1993. Pp 3-27. ISSN -0121-6007
- Navarro O.R. (1994) *Antología del valle de Omate*. Universidad National San Agustín, Arequipa.
- Palais J., Germani and Zielinski G., (1992). Transporte interhemisférico de ceniza volcánica de una erupción volcánica de 1259 d.C. a las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida. abril de 1992. *Cartas de investigación geofísica* 19(8):801-804. DOI: 10.1029/92GL00240
- Paul G. A., et al. (2024). Cryptotephra preserved in Lake Suigetsu (SG14 core) reveals the eruption timing and distribution of ash fall from Japanese volcanoes during the Late-glacial to early Holocene. *Quaternary Science Reviews*: 324 (2024) 108376. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108376>

- Pedrazzi D., et al. (2019). The Ilopango Tierra Blanca Joven (TBJ) eruption, El Salvador: Volcano-stratigraphy and physical characterization of the major Holocene event of Central America. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 377 (2019) 81–102. journal homepage: www.elsevier.com/locate/jvolgeores
- Prival J., et al. (2020) New insights into eruption source parameters of the 1600 CE Huaynaputina Plinian eruption. *Perú Bull Volcanol* 82:7. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1340-7>
- Pulgarín, B., Cepeda, H. & Correa, A. (1997). Geología del complejo volcánico Nevado del Huila. Informe Interno. Po-payán: INGEOMINAS.
- Pulgarín, B., Jordan, E. & Linder, W (1996). Cambio glaciar del volcán Nevado del Huila entre 1961 y 1995. *Memorias. VII Congreso Colombiano de Geología*. Bogotá.
- Pulgarín, B., Jordan, E. & Linder, W (2007). Aspectos geológicos y cambio glaciar del volcán Nevado del Huila entre 1961 y 1995. *Memorias. Primera conferencia internacional de cambio climático: Impacto en los sistemas de alta montaña*. Bogotá: IDEAM, Universidad de Zúrich, pp.123-140. Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC). (1994). El sismo de Páez (Cauca) del 6 de junio de 1994. *Boletín Mensual de Sismos*, 2(13), 6, Santafé de Bogotá: INGEOMINAS, USGS. (2007a) Imagen QuickBird, 0,6 m de resolución, del 7 de febrero de 2007. US Geological Survey.
- Qian P., Guang Hu, Chaowei Hu, and Fansheng M. (2022). The relationship between Zr/Al and total organic carbon: A proxy for the presence of cryptotephra in black shales, *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, Volume 602, 2022, 111155, ISSN 0031-0182, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111155>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003101822200325X>).
- Rovere E.I., et al. (2021). Aspectos tefrológicos de la erupción del volcán Quizapú de 1932 en la región de la Laguna Llanecanelo, Payenia (Mendoza, Argentina). *GEVAS RED Argentina - Grupo de Estudio de Volcanes, Ambiente y Salud*. Asoc. Civil. gevasred@gmail.com
- Scot S.J. y Anchukaitis K.J., (2015). Sobre la erupción del Tambora en 1815 DC. y la cuestión de los anillos de los árboles fuera de lugar diciembre 2015. DOI:10.22498/páginas.23.2.60. *Science Highlights: Volcanoes and climate*. V23 No. 2, dic. 2015
- 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/geo2526>
- Soil Survey Staff (SSS). (2014). *Keys to Soil Taxonomy*. Eleventh Edition. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C. 338 p.
- Thouret J., Juvigné E., Gourgaud A., Boivin P., and Dávila J. (2002) Reconstruction of the 1600 CE explosive eruption at Huaynaputina volcano, Peru, based on geologic evidence and spanish chronicles. *J. Volcanol Geoth Res* 115(3–4):529–570. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00323-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00323-7)
- Walsh A., et al. (2021). Complexities in European Holocene cryptotephra dispersal revealed in the annually laminated lake record of Diss Mere, East Anglia. *Quaternary Geochronology* 66 (2021) 101213. www.elsevier.com/locate/quageo
- Vergara C. (2014). Volcán Tambora (Indonesia) en 1815: La erupción más grande de la historia y sus consecuencias. *Curso de Volcanología Física, otoño 2014*. Profesor Ángelo Castruccio. Autor: Camilo Vergara. Junio de 2014. Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. 13p.
- Zielinski G. A. (2002). Climatic Impact of Volcanic Eruptions. Mini-revisión *El Revista Mundo Científico* (2002) 2, 869–884 ISSN 1537-744X; DOI 10.1100/tsw.2002.83. https://www.researchgate.net/publication/250902740_Climatic_Impact_of_Volcanic_Eruptions#fullTextFileContent
- Zielinski, G. A. et al. (1994). "Climatic Impact of the A.D. 1783 Asama (Japan) Eruption was Minimal: Evidence from the GISP2 Ice Core" (1994). *Earth Science Faculty Scholarship*. Paper 191. http://digitalcommons.library.umaine.edu/ers_facpub/191