



Dispersión regional de tefra proveniente de los volcanes andinos y su alcance en Paraguay

Regional Dispersion of Tephra from the Andean Volcanoes and its Impact in Paraguay

Moisés A. GADEA^{1*}, Alcides M. CABALLERO²

¹ Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT). Investigador Categorizado PRONII 1, Asunción, Paraguay.

² Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Laboratorio de Sismología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción.

* Autor de correspondencia: <moi7moses@yahoo.com>

RESUMEN

Según los escasos registros periodísticos, de reportes científicos y del testimonio de algunos pobladores en el territorio paraguayo, la actividad volcánica en la Cordillera de los Andes ha tenido repercusiones en el territorio paraguayo. Esto se refiere a la dispersión de tefra proveniente de diferentes conductos volcánicos del tipo zona de subducción en el Cinturón del Fuego del Pacífico localizados en la faja andina chilena, que propiciados por las magnitudes de las erupciones y las direcciones del viento, se desplazaron por advección en la atmósfera y arribaron a Paraguay. En el presente trabajo se destaca al menos seis eventos de ese tipo: la erupción del volcán Calbuco en el año 2015; del Puyehue en el año 2011; del Láscar en los años 2000 y 1993; del Quizapú en el año 1932; y del Cerro Blanco en el Holoceno.

Palabras clave: Cenizas; Chile; Erupciones; Paraguay; Volcanes.

ABSTRACT

According to the scarce journalistic records, scientific reports and the testimony of some inhabitants in Paraguayan territory, volcanic activity in

► Ref. bibliográfica: Gadea, M. A.; Caballero, A. M. 2024. "Dispersión regional de tefra proveniente de los volcanes andinos y su alcance en Paraguay". *Acta Geológica Lilloana* 35 (2): 127-166. doi: <https://doi.org/10.30550/j.agl/1906>

► Recibido: 9 de abril 2023 – Aceptado: 6 de agosto 2024



► URL de la revista: <http://actageologica.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

the Andes Mountain Range has had repercussions in Paraguayan territory. This refers to the dispersion of tephra originating from different volcanic conduits of the subduction zone type in the Pacific Ring of Fire located in the Chilean Andean belt, which, driven by the magnitudes of the eruptions and wind directions, traveled by advection in the atmosphere and arrived in Paraguay. This paper highlights at least six events of this type: the eruption of the Calbuco volcano in 2015; of Puyehue in 2011; of Láscar in the years 2000 and 1993; of Quizapú in 1932; and of Cerro Blanco in the Holocene.

Palabras clave: Ashes; Chile; Eruptions; Paraguay; Volcanoes.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen 1.330 volcanes en el mundo que erupcionaron en los últimos 10.000 años. Estas manifestaciones se encuentran entre los peligros naturales de mayor poder destructivo en la Tierra, capaz de causar penurias y grandes pérdidas económicas a los seres humanos, por impacto directo o por reacción en cadena; así también, alteraciones en el clima o extinciones de seres vivos. A pesar de la baja frecuencia de erupciones moderadas a mayores, estas presentan alto riesgo, especialmente para aquellos poblados cercanos a los conductos eruptivos (Casadevall y Thompson, 1999; Freire *et al.*, 2019).

La polución del aire por actividad volcánica explosiva o efusiva también puede afectar poblados muy alejados de la abertura volcánica, por días o incluso por mucho tiempo. En la actualidad, cerca de mil millones de personas habita a menos de 100 km de un volcán activo. Las erupciones volcánicas pueden causar heridas o fatalidades por medio de un amplio espectro de manifestaciones, tales como flujos piroclásticos, piroclastos balísticos, flujos de lahars, de lava, corrientes asfixiantes de CO₂ (Steward *et al.*, 2022).

El territorio paraguayo se encuentra en el centro de la Placa Sudamericana (Fugarazzo *et al.*, 2021), por lo cual presenta relativa estabilidad cortical endógena en virtud de su lejanía de los bordes de las placas tectónicas. Esto concierne principalmente a la actividad sísmica y volcánica, en notorio contraste con los escenarios tectonovolcánicos que ocupan el Cinturón del Fuego del Pacífico, donde periódicamente se reportan desastres naturales que conllevan pérdidas humanas y edilicias (Kulánek, 1990).

En relación al volcanismo paraguayo, se ha comprobado evidencia petrológica de actividad volcánica en varios periodos a lo largo de su tiempo geológico. Desde el Mesoproterozoico, expresado por las ignimbritas del Cerro Las Tres Marías en Fuerte Olimpo (Barros Gomes *et al.*, 2000), hasta los conos ígneos del último pulso magmático establecidos durante la Reactivación del Ciclo Andino; dicha reactivación guarda relación con la orogenia de la Cordillera de los Andes durante el Cenozoico Inferior

(Proyecto PAR, 1986). Al referido episodio corresponden las rocas de la Provincia Alcalina de Asunción (Bitschene y Báez Presser, 1989), con la presencia comprobada de sedimentos volcanoclásticos en algunos puntos bien localizados (Miraglia, 1965)

Desde la perspectiva actual, no existen volcanes activos en Paraguay; ni tampoco se han reportado indicadores marcados que señalen o susciten sospechas acerca de algún foco volcánico activo o inminente, ni alusiones al respecto por los antiguos pobladores o antepasados en textos históricos, por lo cual se ajusta consignar que el volcanismo paraguayo en la actualidad es nulo.

Aun cuando en Paraguay el riesgo volcánico autóctono es inexistente, dicho país no puede sustraerse de los efectos de las erupciones volcánicas regionales, cuando estos volcanes se manifiestan de maneras muy temperamentales expulsando gran cantidad de tefra y que viajan grandes distancias por acción del viento a través de la atmósfera terrestre, especialmente de aquellos que se localizan en la faja Andina, y que, según los escasos registros, afectaron de alguna forma al entorno ambiental paraguayo. El objetivo de este trabajo radica en realizar consideraciones acerca de este tipo de eventos.

Tefra o cenizas volcánicas

Del griego, τέφρα (*tephra*) es ceniza. En un sentido general, tefra se aplica a toda partícula expulsada durante una erupción, independientemente de su forma, tamaño o composición. Sin embargo, ceniza, se refiere de un modo riguroso a fragmentos de vidrios o cristales magmáticos y otras rocas (materiales líticos) con un diámetro inferior a 2 mm. Las rocas fueron pulverizadas y reducidas a ese tamaño debido a la elevada presión de los gases dentro de un volcán. Las cenizas volcánicas se forman durante erupciones volcánicas explosivas, y este tipo de manifestaciones ocurren cuando los gases disueltos en la roca fundida (magma) se expanden y escapan violentamente al aire, o cuando el agua se hierve por el magma convirtiéndose repentinamente en vapor. El gas en expansión también desgarrar el magma y lo arroja al aire, donde se solidifica en fragmentos de roca volcánica y vidrio volcánico. (Kenedi *et al.*, 2000; Dingwell *et al.*, 2011; Grob *et al.*, 2012)

Aunque se le denomina *ceniza*, esta no es el producto una combustión, como el material suave y esponjoso creado como producto de la combustión de la madera, hojas o papel. La ceniza volcánica es dura, no se disuelve en agua, es extremadamente abrasiva, ligeramente corrosiva y conduce electricidad en presencia del agua. En erupciones explosivas, el magma se fragmenta por exsolución rápida de componentes volátiles disueltos para producir materiales piroclásticos, que luego se redistribuyen en amplias regiones distantes a la fuente volcánica según la dirección dominante del viento por encima del volcán (Kenedi *et al.*, 2000; Nakagawa y Ohba, 2002).

Dispersión de las cenizas volcánicas

La capacidad de desplazarse grandes distancias convierte a los frentes de cenizas en una de las manifestaciones volcánicas de mayor incidencia en la sociedad. Los fragmentos de roca muy finos o gotas de magma que han sido eyectados son transportados por advección del viento, es decir, transporte por acción del viento (Del Pozo y Mendiola, 2014).

Las magnitudes de estos efectos dependen de la cantidad de partículas expulsadas en la atmósfera, la ubicación, el momento de la erupción y la influencia de la dinámica atmosférica en la extensión de la cobertura global de emisiones (Moorthy *et al.*, 1996 en Lettino *et al.*, 2012). Ciertamente las partículas de aerosol de las erupciones volcánicas a menudo se consideran una importante fuente natural de elementos potencialmente tóxicos como el azufre, el flúor y varios elementos traza (Cronin *et al.*, 2003; Mather *et al.*, 2003 en Lettino *et al.*, 2012).

Bajo condiciones meteorológicas propicias para un volcán de alta energía, sus cenizas podrían circular en ciclos alrededor del planeta, como ocurrió luego de la erupción del Krakatoa en 1883, cuyas cenizas cerraron cinco ciclos alrededor del globo planetario en dos semanas (Shaller *et al.*, 2009). Entre los recientes, luego de las erupciones del Pinatubo en 1991 y Tonga en el 2021 las cenizas rodearon al planeta (McCormick *et al.*, 1995 en Moran *et al.*, 2023).

Las cenizas volcánicas y la aviación

La dispersión de cenizas en la atmósfera incide de manera importante en la aeronavegación. Las derivaciones que causa son de diversa índole, tales como cancelación, desvíos de trayectorias pautadas o inhabilitación de aeropuertos. De manera de evitar en lo posible el encuentro de aeronaves con las cenizas en pleno vuelo, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) estructuró un sistema internacional de monitoreo de alerta de ceniza volcánica a nivel global (Volcanic Ash Advisory Centre) en el año 1998. Esta organización consta de nueve centros de aviso, que pronostican y brindan información acerca de las condiciones atmosféricas en relación a las cenizas volcánicas en el aire (Reckziegel *et al.*, 2019).

Las cenizas dispersas en las alturas provocan desperfectos en los motores, daños en los sistemas aviónicos y abrasión en las partes expuestas del fuselaje (Prata y Rose, 2015). Motores modernos de turbinas a reacción de alta derivación operan a temperaturas que exceden el punto de fusión de numerosos minerales y silicatos. Así también, la escasa tolerancia de los elementos que constituyen el fuselaje, los sistemas hidráulicos y eléctricos pueden ser afectados por la densidad y el tamaño de las cenizas. La acreción de cenizas en las hélices de las turbinas puede producir inestabilidad o dificultad de reinicio de los motores (Lechner *et al.*, 2017).

Desde el año 1953 hasta el 2009 se han reportado 129 incidentes de aeronaves causados por cenizas volcánicas. 79 de ellos reportaron daños físicos de los aviones; 26 se consideran severos, cuando uno o dos motores se detuvieron por mal funcionamiento, mientras que en otras circunstancias parecidas experimentaron interrupción de energía eléctrica (Guffanti *et al.*, 2010 en Lechner *et al.*, 2017).

El 24 de junio del año 1982, los cuatro motores de un Boeing B747 se detuvieron en pleno vuelo por efecto de las cenizas provenientes del volcán Galunggung en la zona de Indonesia. Ante tal circunstancia, el avión continuó el vuelo en modo *planeamiento* hasta su aterrizaje en el aeropuerto de Jakarta, logrando así evitar un siniestro aéreo (van Geffen *et al.*, 2009). Otro incidente muy similar se experimentó en el año 1989 en un Boeing B747 por su encuentro con las cenizas del volcán Redoubt en Alaska (Miller y Casadevall, 2000 en Lechner *et al.*, 2017).

Con la erupción del volcán Eyjafjallajökull en Islandia, en los meses de abril y mayo del 2010, el tráfico aéreo comercial entre los corredores de Estados Unidos, Europa y Asia fue interrumpido generando así cuantiosas pérdidas económicas. La incomunicación entre esas rutas aéreas no ocurría desde la Segunda Guerra Mundial (Prata y Rose, 2015).

Según la organización Europea para la seguridad de navegación aérea, este incidente con las cenizas del volcán de Islandia causó la suspensión de más de 104.000 vuelos, suceso que afectó a millones de pasajeros que quedaron varados en aeropuertos de toda Europa y en todo el mundo, ya que el tráfico aéreo hacia y desde Europa se canceló. Lo ocurrido en ese entonces no tiene precedentes a nivel mundial (Jónsdóttir, 2011).

La caída o lluvia de cenizas

Las lluvias de tefra o de cenizas suelen ser frecuentes y peligrosas. Pueden originarse por dos mecanismos: i. A partir de una columna o nube eruptiva ii. Caídas desde nubes de cenizas o corrientes piroclásticas (Tilling, 2014).

Durante la elevación de la nube de tefra, los piroclastos más pesados siguen trayectorias balísticas desde el cráter del volcán y generalmente viajan solo unos pocos kilómetros como máximo. Estos consisten en *bloques* que son densos y angulares, así como *bombas* que son vesiculares y redondeadas. Tienen un tamaño de grano mayor de 64 mm. Las partículas menos pesadas, llamadas *lapilli*, son suspendidas inicialmente por la turbulencia en la nube eruptiva pero pesan en demasía para ser transportadas por el viento. El tamaño de grano de los lapillis es de 2 a 64 mm. Las partículas más ligeras, llamadas *cenizas*, son de tamaño de grano inferior a 2 mm. Estas partículas quedan suspendidas por el viento una vez que abandonan la nube eruptiva. A medida que la nube deriva desde el volcán en erupción, la ceniza que cae de la nube generalmente decrece en tamaño y forma una capa más delgada (Kenedi *et al.*, 2000; Scott, 2021).

Los diversos clastos volcánicos, sean juveniles o líticos, son transportados por una corriente de turbulencia, que a su vez depende de las características de la partícula y las condiciones atmosféricas. Cuando las velocidades de caída de las partículas son mayores que los vectores de ascenso de las corrientes de turbulencia, las partículas caen y son movilizadas por el viento. Las características de los depósitos de tefra dependen de la dinámica de la pluma eruptiva (altura, perfil de velocidad, vorticidad de pluma débil), los aspectos atmosféricos (campo del viento, densidad y viscosidad) y los procesos de sedimentación (agregado de partículas, inestabilidades, mammanatus) (Bonadonna y Costa, 2013).

El impacto de los depósitos de cenizas

Así como las cenizas volcánicas inciden en la aeronáutica cuando se encuentran en la atmósfera, una vez depositados pueden afectar severamente al medio ambiente, a la salud de las personas y de otros seres vivos. También incide en las actividades de la agricultura y ganadería, del sector económico y turístico; en las infraestructuras urbanas críticas, tales como sistemas de alimentación eléctrica, abastecimiento de agua para consumo humano, tratamiento de desperdicios, transporte, comunicaciones, etc. Estas consecuencias involucran la gestión de emergencias (Wilson *et al.*, 2013).

Según Amat-Baeza y Giesen (2023), las erupciones volcánicas ocurren en numerosos lugares en el mundo, incluso en regiones con alta densidad poblacional o cercanas a grandes ciudades. Al menos 500 millones de personas se encuentran en riesgo de exposición a gases y cenizas volcánicas que podrían causar efectos negativos en la salud tales como crisis respiratorias agudas, cardiovasculares, oftalmológicas, cutáneas y enfermedades crónicas. Se recomienda evitar la exposición innecesaria a las cenizas y el uso de máscaras ante situaciones de mayor severidad (Grob *et al.*, 2012).

Zonas volcánicas en América del Sur

El volcanismo Sudamericano se manifiesta principalmente en la faja de la Cordillera de los Andes y se relaciona a los procesos de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. Esta región se localiza en el margen suroriental del complejo tectonovolcánico mundial conocido como *el Cinturón del fuego del Pacífico* (Antayhua y Tavera, 2003; Kulánek, 1990).

Como se aprecia en la Figura 1, Los cinturones volcánicos andinos no presentan continuidad a lo largo de la cordillera en Sudamérica, sino que se despliegan en cuatro segmentos separados y conocidos como *Zonas Volcánicas de los Andes*. La actividad volcánica es manifiesta donde el ángulo de subducción supera los 25°, mientras que en los niveles abisales de las zonas de los segmentos no volcánicos se produce una convergencia relativamente plana y con escaso ángulo (10°) a profundidades que superan

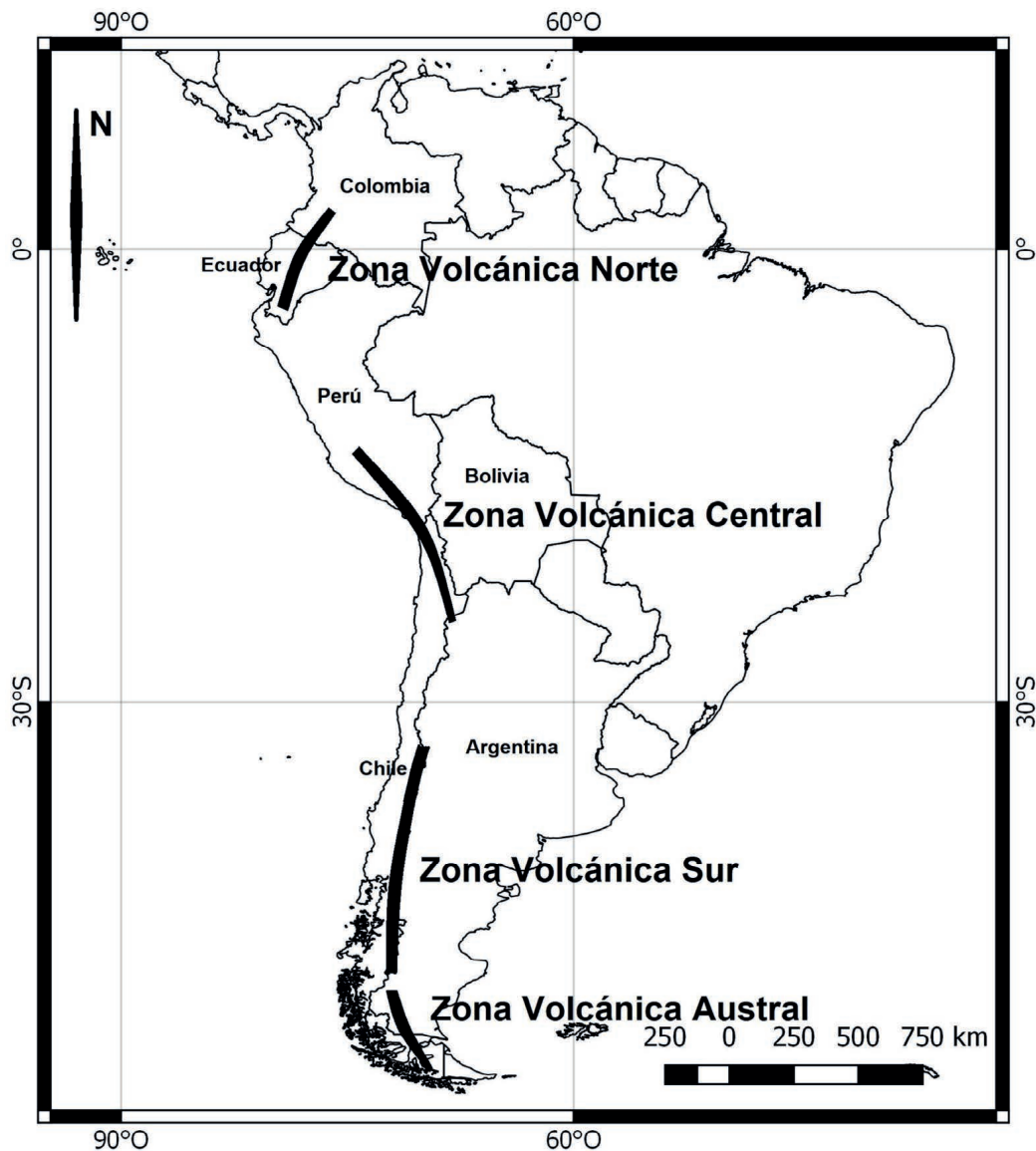


Figura 1. Despliegue regional de los cinturones volcánicos en Sudamérica. Modificado de Serra (2017).

los 100 km. Estas regiones de bajo ángulo de subducción se habrían originado en tiempos del Mioceno por la consumición de *plateaus* y dorsales oceánicas, de lo cual se deduce el carácter transitorio del estado actual de segmentación de los arcos volcánicos andinos. Se ha demostrado la correlación entre el volcanismo y la subducción, en el que el magmatismo se origina por deshidratación y fusión de la corteza oceánica que se sumerge bajo la Placa Sudamericana y posteriormente interacciona con el magma de la astenósfera (Stern, 2004).

Estos segmentos o zonas volcánicas son agrupados de la siguiente manera: a. Zona Volcánica Norte de los Andes (ZVNA), que comprende la porción andina de Colombia y Ecuador con expresión NE – SO. Ejemplos de unidades volcánicas representativas de dicha zona: Nevado del Ruiz

(Colombia); Cotopaxi (Ecuador) **b.** Zona Volcánica Central de los Andes (ZVCA), extendida en sentido NO – SE, desde el sur de Perú, oeste de Bolivia, norte de Chile y noroeste de Argentina. Ejemplos: El Misti (Perú); Sajama (Bolivia); Láscar (Chile); Ojos del Salado (Chile – Argentina) **c.** Zona Volcánica Sur de los Andes (ZVSA), delineada en dirección NE - SO desde el sector centro-sur de Chile y en la frontera occidental de Argentina con Chile. Ejemplos: Villarrica y Llaima (Chile) **d.** Zona Volcánica Austral de los Andes (ZVAA), que consta de seis volcanes en el sur de la Patagonia alineados en sentido NO – SE. Ejemplos: Lautaro y Cook (Chile) (Antayhua y Tavera, 2003; Amigo, 2004; Martinic, 2008).

En la Zona Volcánica Norte existen 58 volcanes activos, de los cuales 34 se encuentran dentro del territorio ecuatoriano y 23 en el colombiano. En la Zona Volcánica Central los volcanes activos son 80: 33 en el territorio chileno, 19 en el argentino, 16 en el peruano y 12 en el boliviano. En la Zona Volcánica Sur se emplazan 72: 54 en el territorio chileno y 18 en el argentino. En la Zona Volcánica Austral los volcanes activos son seis; cinco de ellos dentro del territorio chileno y uno en el argentino (Stern, 2004; Forte *et al.*, 2021).

Los volcanes que afectaron a Paraguay según reportes

1) El volcán Calbuco.— CHILE. Región de los Lagos 41,330°S y 72,608°O; 2.015 m s.n.m.

Emplazado en la porción meridional-austral de Chile, en la Zona Volcánica Sur de los Andes a unos 30 km al noreste de Puerto Mont y casi a 30 km al este de Puerto Varas (Stern *et al.*, 2007).

Se trata de un estratovolcán establecido sobre un pedestal granitoide miocénico y metasedimentos del Paleozoico. Presenta cuatro conductos principales y su edificio fue construido durante el Cenozoico Superior. Las emisiones de magma varían dependiendo de su época histórica: en la base presenta composición andesita-basáltica, seguido por andesitas, y finalmente ignimbritas andesítico-basálticas (Sellés y Moreno, 2011).

2) El volcán Puyehue (Complejo Cordón Caulle).— CHILE. Región de los Ríos 40,580°S y 72,200°O; 2.240 m s.n.m.

El grupo volcánico Puyehue – Cordón Caulle se encuentra en la Zona Volcánica Sur de los Andes, aproximadamente a 125 km al sureste de la ciudad de Valdivia y a 82 km al este de Osorno. Este complejo volcánico del Pleistocénico Superior - Holoceno consta de un estratovolcán, el Puyehue propiamente, la caldera Cordillera Nevada y el Cordón Caulle. Sobre el último mencionado, cabe señalar que se comporta como un volcán fisural de 15 km de extensión y cuatro de ancho en sentido NO – SE (Moreno y Petit-Breuilh, 1998).

Materiales piroclásticos andesítico-dacíticos han sido expulsados en grandes cantidades por este conducto volcánico. Una erupción fisural notable, con emisión de riolitas siguió al terremoto de 1960, el cual tuvo una magnitud de 9,5 (el de mayor violencia registrado históricamente) (Stern *et al.*, 2007).

3) El volcán Láscar.— CHILE. Región de Antofagasta 23,372°S y 67,711°O; 5.592 m s.n.m.

El volcán Láscar se sitúa a 70 km al sureste de la ciudad de San Pedro de Atacama. El Láscar, un estratovolcán joven y elongado, con volumen estimado de 30 – 40 km³, se encuentra activo desde hace 230.000 años con estructura compuesta por dos conos y cinco cráteres alineados en dirección ENE (Viramonte *et al.*, 1995; Stern *et al.*, 2007).

Se localiza en el contexto de la Zona Volcánica Central de los Andes. A este volcán se lo considera como el que presenta mayor actividad en su zona volcánica habiendo sido ya reportado desde principios del siglo XVI con la llegada de los españoles en la región y que continúa vigente. El tipo de magma que expulsa es andesítico-dacítico. Se destaca por su emisión normal de fumarolas desde su cráter central con ingresos ocasionales en fases explosivas del tipo vulcaniano (Hellweg, 1999; Aguilera *et al.*, 2003; Amigo *et al.*, 2012; Pérez, 2020).

4) El volcán Quizapú (Complejo El Descabezado – Cerro Azul).— CHILE. Región del Maule 35,658°S y 70,763°O; 3.050 m s.n.m.

Este complejo consta de más de 40 conductos volcánicos que cubren un área aproximada de 500 km². El Descabezado y Azul son estratovolcanes, y el Quizapú, emplazado como una abertura lateral de los primeros. Este volcán nació el 26 de noviembre de 1846 con la unión de las bases (antes separadas por una grieta) del Descabezado Grande y Cerro Azul. Se encuentra en la Zona Volcánica Sur de los Andes, casi a 240 km al sur de Santiago (De la Cerda, 1934; Rovere *et al.*, 2012).

Este complejo volcánico ha generado grandes cantidades de ignimbritas durante el Pleistoceno, así también volúmenes considerables de tefra y lavas durante tiempos del Holoceno. El Descabezado Grande y el Quizapú comparten una historia eruptiva desde el siglo XIX, y aparentemente otra nueva erupción tendrá lugar en un futuro cercano. Podrían esperarse columnas vulcanianas o plinianas de pumitas, dispersión de tefra y corrientes piroclásticas (Stern *et al.*, 2007).

5) La caldera volcánica Cerro Blanco.— ARGENTINA. Provincia de Catamarca 26,765°S y 67,746°O; 4.670 m s.n.m.

El emplazamiento se encuentra en el borde sur del planalto Antiplano-Puna, en la Zona Volcánica Central de los Andes. Forma parte de un Complejo Volcánico denominado Cerro Blanco (CBVC) en el que se ha reconocido cuatro calderas: El Niño, el Pie de San Buenaventura, Robledo

y Cerro Blanco. Las edades de los tres primeros se desconocen, y se cree que pertenecen a una unidad volcánica de mayor envergadura (Guzmán *et al.*, 2017; Pritchard y Simons, 2002; Báez *et al.*, 2015 en Fernandez Turiel *et al.*, 2019).

La actividad de estas calderas generó siete domos de lavas, depósitos de corrientes piroclásticas densas y de caída. El Complejo Volcánico Cerro Blanco es considerado activo, en el que se ha reconocido disminución progresiva de subsidencia de caldera y actividad hidrotermal manifiesta (Fernandez Turiel *et al.*, 2019; Báez *et al.*, 2017; Guzmán *et al.*, 2017).

Esquema de datos generales

Tabla 1. Lista de volcanes cuyas erupciones afectaron a Paraguay y sus aspectos geográficos.

Tabla 2. Información adicional.

Tabla 3. Fechas de erupciones* y características. * Con incidencia el territorio paraguayo. ** Índice de Explosividad Volcánica: Medida que expresa magnitud o intensidad del poder destructivo y dispersivo, violencia o liberación de energía de una erupción (Newhall y Self, 1982).

Datos geográficos. El mapa regional de una porción sur de Sudamérica (Figura 2) con el emplazamiento de los volcanes cuyas cenizas arribaron a Paraguay. La mayoría de los volcanes se localizan en el territorio chileno en la faja de la Cordillera de los Andes.

Figura 2. Posición geográfica de los volcanes Calbuco, Puyehue, Láscar, Quizapú, y Cerro Blanco con respecto a Paraguay.

Tabla 1. Lista de volcanes cuyas erupciones afectaron a Paraguay y sus aspectos geográficos.

VOLCÁN	LATITUD (Sur)	LONGITUD (Oeste)	ALTITUD (m s.n.m.)	PAÍS
Calbuco	41,330°	72,608°	2.015	Chile
Puyehue	40,580°	72,108°	2.200	Chile
Láscar	23,372°	67,711°	5.592	Chile
Quizapú	35,658°	70,763°	3.788	Chile
Cerro Blanco	26,765°	67,746°	4.670	Argentina

Tabla 2. Información adicional.

VOLCÁN	ZONA VOLCÁNICA	TIPO	EDAD	ACTIVIDAD
Calbuco	Sur	Estratovolcán	Pleistoceno-Holoceno	Activo
Puyehue	Sur	Estratovolcán	Pleistoceno-Holoceno	Activo
Láscar	Central	Estratovolcán	Pleistoceno-Holoceno	Activo
Quizapú	Sur	Estratovolcán	Plioceno-Holoceno	Activo
Cerro Blanco	Central	Caldera	Pleistoceno-Holoceno	Activo

Tabla 3. Fechas de erupciones y características.

VOLCÁN	FECHA DE ERUPCIÓN*	TIPO DE ERUPCIÓN	IEV**	TIPO DE MAGMA
Calbuco	22 abril 2015	Vulcaniano	4.5	Basalto-andesítico
Puyehue	04 junio 2011	Vulcaniano	4.5	Riolítico
Láscar	20 julio 2000	Vulcaniano	2-3	Andesítico-Dacítico
Láscar	18 abril 1993	Pliniano	4	Andesítico-Dacítico
Quizapú	10 abril 1932	Pliniano	5	Dacítico
Cerro Blanco	4400 – 4150 ATP	Pliniano	7	Riolítico

* Con incidencia en el territorio paraguayo.

** Índice de Explosividad Volcánica: Medida que expresa magnitud o intensidad del poder destructivo y dispersivo, violencia o liberación de energía de una erupción (Newhall y Self, 1982).



Figura 2. Posición geográfica de los volcanes Calbuco, Puyehue, Láscar, Quizapú, y Cerro Blanco con respecto a Paraguay.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del trabajo se ha procedido al acopio de información dispersa en los medios de prensa en relación a las repercusiones en Paraguay ante los eventos volcánicos andinos. Así también, a continuación y de manera complementaria se ha recopilado información bibliográfica de carácter netamente científico acerca de la naturaleza de los volcanes que involucra esta investigación, sus antecedentes, características, descripción del tipo eruptivo, duración, tipos de materiales extruidos, fechas de los eventos y llegada de piroclastos a Paraguay. Con el propósito de estimar el alcance regional o global de la dispersión de cenizas, se ha modelado con el simulador Ash3d de la *United States Geological Survey* para tres eventos, según la capacidad de resolución temporal del simulador y mediante el acceso y conocimiento de los parámetros requeridos para su funcionamiento correcto. En la elaboración de mapas para expresar grado de cobertura, alcance, densidad, dispersión y altitud de cenizas en la atmósfera local se ha utilizado el *software* QGis Las Palmas (v. 2.18). En una visita a la hemeroteca de la Biblioteca Nacional de Paraguay se obtuvo información acerca de la llegada de cenizas volcánicas a Paraguay luego de la erupción del volcán Quizapú en 1932. Esto fue posible de comprobar por medio de las tiradas de periódicos de aquella época que fueron conservados en el repositorio de la mencionada institución.

RESULTADOS

1) Calbuco. La erupción del 22 de abril 2015, 21:04 UTC

Ingresó en una fase eruptiva luego de 54 años (1961). La erupción fue de carácter vulcaniano en dos pulsos: la primera, de 1,5 horas de duración generando una pluma de 15 km s.n.m; la segunda, siendo la principal, luego de una pausa de 5,5 horas, reanudó su actividad la cual persistió por 6 horas, con el penacho de gases y piroclastos que alcanzaron los 17 km s.n.m. Los depósitos piroclásticos (depositados preferencialmente hacia el noreste) fueron espesos en Chile y Argentina, que generaron un impacto social y ecológico considerable (Bertin *et al.*, 2015; Romero *et al.*, 2017).

Los depósitos de caída consistieron fundamentalmente en escorias de carácter basalto-andesítico y fragmentos líticos, con un volumen depositado, según estimaciones, de 0,38 km³. El índice de explosividad volcánica inferido para este evento es de 4 (Segura, 2016).

Dispersión de cenizas.— Posterior a la erupción del Calbuco una extensa pluma de cenizas fue dispersada cruzando el norte de la Patagonia, que luego se orientó hacia el sureste del Océano Pacífico y el suroeste del Océano Atlántico (Vergara-Jara *et al.*, 2021).

La pluma volcánica se dispersó extensivamente por el Hemisferio Sur. La dirección de transporte fue preferentemente hacia el este, en forma de lenguas bifurcadas de escala planetaria. Parte de la pluma alcanzó Sudáfrica una semana luego de la erupción (Bègue *et al.*, 2020).

Esto también se confirma con la simulación con Ash3d y modelos de dispersión de cenizas obtenido por la NASA (2016), donde se observa las nubes de aerosoles alcanzando el Océano Índico y la isla de Madagascar, en otro desmembramiento de la pluma que fue desplazada sobre el Océano Antártico.

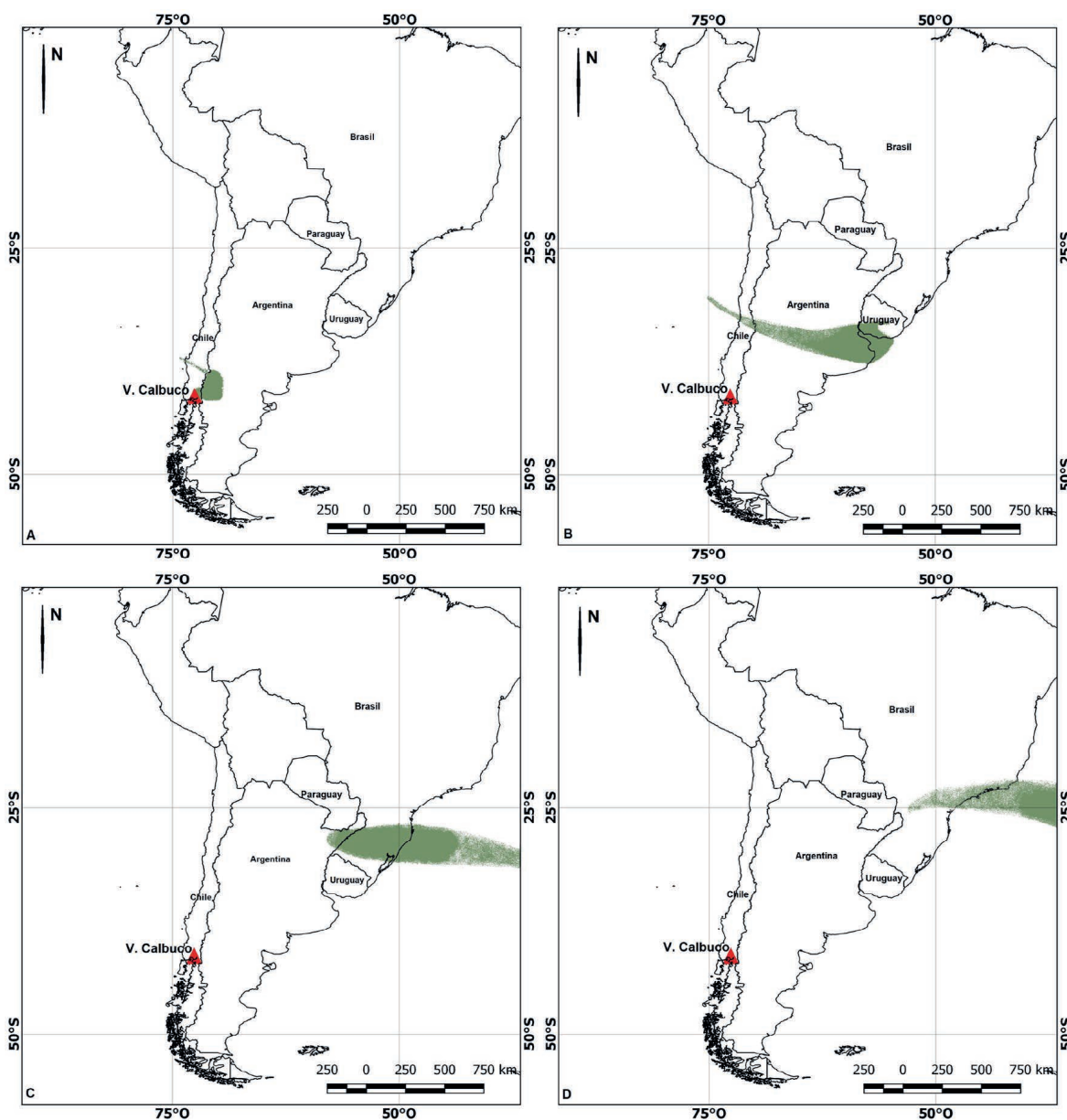


Figura 3. Cronología parcial de dispersión de cenizas luego de la erupción del Calbuco. A. 23 de abril 2015. B. 24 de abril 2015. C. 25 de abril del 2015. D. 26 de abril 2015. Modificado de NASA Earth Observatory (2015).

Repercusiones en Paraguay.— Luego de la erupción del volcán Calbuco el día 22 de abril, los piroclastos viajaron en dirección noreste aproximadamente 2.160 km por la estratósfera luego de tres días, hasta alcanzar la frontera sur de Paraguay con Argentina (Figura 3C).

La Dirección de Meteorología Aeronáutica monitoreó la trayectoria de la nube de cenizas volcánicas por medio de imágenes satelitales, y según lo observado, esta bordeó el sur de Paraguay en dirección a Brasil el día 25 de abril de 2015. La criptotefra se encontraba sobre la ciudad de Encarnación, y debido a su reducido tamaño las partículas no fueron divisadas a simple vista, pero sí en la ciudad contigua de Posadas en Argentina. El avance del frente de cenizas no produjo interrupción en el tráfico aéreo en la zona (Ultima Hora, 2015).

Según el modelo de dispersión de cenizas elaborado por la NASA Earth Observatory (Figura 3C) el frente se desplazó hacia el noreste, y tangencialmente alcanzó el sur de Paraguay. No se han reportado depósitos de caída en Paraguay, sin embargo, por medio del modelo de Ash3d de la USGS, se ha conseguido reconocer que las fracciones más finas de las cenizas ingresaron el día 25 de abril hacia el sur de Paraguay, y que posteriormente cubrieron gran parte de la Región Oriental del Paraguay el día 27 de abril, en donde también fue alcanzado parte del bajo Chaco (Figura 4).

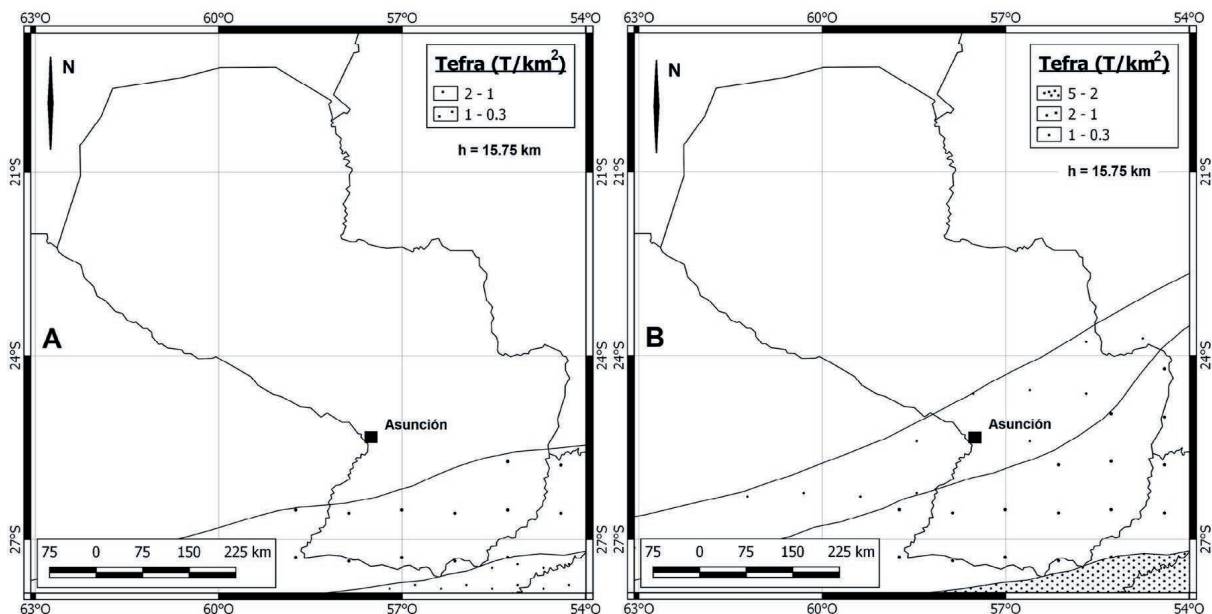


Figura 4. El alcance de las cenizas volcánicas en el territorio paraguayo según el modelo Ash3d utilizando los parámetros de erupción de Mella *et al.* (2015): fecha y hora de inicio: 22 abril 2015 21:04:00. Altura de pluma: 15 km; duración de erupción: 1,5 horas; tiempo de simulación: 144 horas; volumen expulsado: 0,3 km³. El modelo indica una altura de 15,75 km (estratósfera) para el frente de cenizas A. Día 25 de abril 2015. La carga de cenizas en la atmósfera con baja densidad en los departamentos de Neembucu, Caazapa, Itapua y parte de Alto Parana B. Día 27 de abril 2015. El núcleo de la criptotefra de escasa densidad de avanza hacia los departamentos de norte de la Región Oriental: Central, Cordillera, Guaira, San Pedro, parte de Caaguazu y Canindeyu; y Presidente Hayes en el bajo Chaco.

2) Puyehue. La erupción del 4 de junio 2011, 19:15 UTC

Esta erupción del Puyehue (Cordón Caulle) es considerada como una de las mayores del siglo XXI y que tuvo gran impacto en la aviación civil en el Hemisferio Sur (Koffman *et al.*, 2017).

Luego de dos meses de actividad sísmica precursora, este volcán inició su fase explosiva con la eyección de una pluma cuya altura alcanzó 10-12 km. El momento paróxico en aquella etapa ocurrió durante las primeras 27 horas entre el lapso del 4 y 5 de junio, y su pluma se elevó hasta los 15 km (Lara *et al.*, 2012).

El índice de explosividad volcánica (IEV) fue determinado en un valor de 4,5, y el tipo de magma fue riolítico. El volumen de tefra expulsado fue de aproximadamente 1 km³. La actividad explosiva del volcán disminuyó. Sin embargo, la fase climática con la dispersión de aerosoles continuó en los meses subsiguientes. La SERNAGEOMIN-OVDAS reportó cese de emisión de cenizas en la atmósfera y efusión de lava en agosto del 2012 (Rovira *et al.*, 2013; Forte *et al.*, 2018).

Dispersión de cenizas.— Con el inicio de la erupción el 4 de junio (Figura 5), el volcán inyectó una pluma de cenizas y ~200 kt de dióxido de azufre (SO₂) que alcanzaron una altura de 12 a 13 km, en la cual se produjo el desplazamiento de las cenizas alrededor del globo terrestre. Observaciones satelitales muestran que la nube de cenizas rodeó la tierra cuatro veces entre los paralelos 40° y 60° entre el 4 de junio y el 20 de julio de aquel año. Cenizas fueron detectadas al sur de África, Australia y Nueva Zelanda (Otero *et al.*, 2012; Clarisse *et al.*, 2013; Klüser *et al.*, 2013 en Koffman *et al.*, 2017).

Repercusiones en Paraguay.— En los días subsiguientes a la erupción del 4 de junio 2011, las emisiones de cenizas continuaron y el penacho se mantuvo por encima de los 12 km dispersándose 1.900 km desde Chile sobre Argentina, con su alcance a Uruguay, Paraguay y Brasil. Partículas de cenizas volcánicas fueron detectadas por medio de filtros de monitoreo de calidad del aire en Porto Alegre, Brasil, entre el 9 y 14 de junio (de Lima *et al.*, 2012 en Wilson *et al.*, 2013; Otero *et al.*, 2012).

Según los modelos de Prata *et al.* (2021), por medio de los simuladores SEVIRI y FALL3D 8.0, se ha determinado la presencia de aerosoles en la atmósfera paraguaya. Para la fecha del 6 de junio se observa una nube de cenizas de baja densidad ingresando desde el suroeste hacia el Chaco central (Figura 6A). En la fecha del 7 de junio, se aprecia a Paraguay cubierto en gran parte por nubes de cenizas volcánicas de diferentes densidades a excepción del centro-oeste y norte del Chaco (Figura 6B).

Se ha reportado caída de cenizas en Ciudad del Este y la zona de la Triple Frontera Brasil-Argentina-Paraguay, a lo cual se ha hecho referencia:

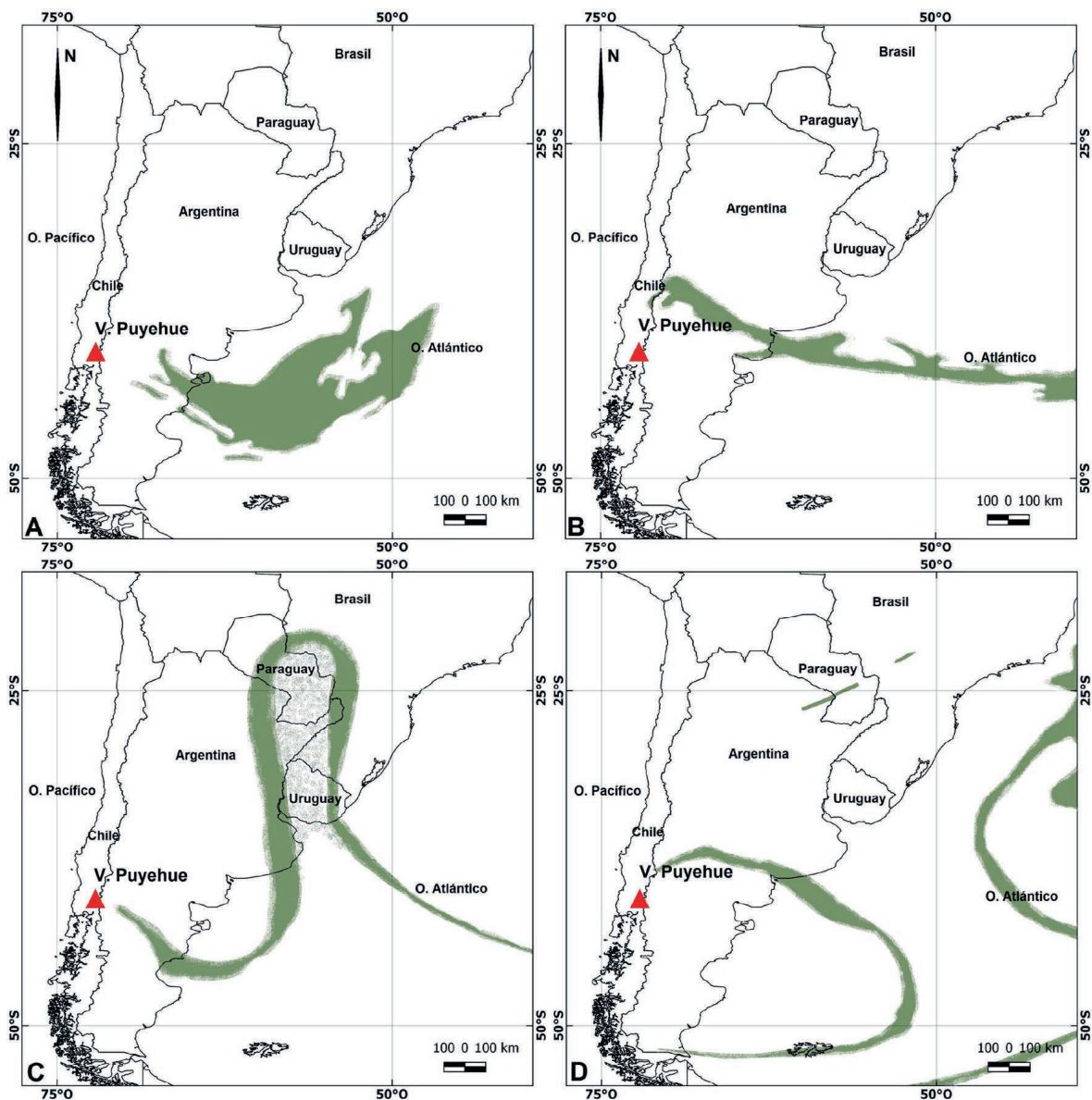


Figura 5. Modelo de transporte de cenizas en la atmósfera. **A.** 5 de junio (15:00 UTC) **B.** 6 de junio (15:00 UTC) **C.** 7 de junio (15:00 UTC) **D.** 8 de junio (15:00 UTC). En el esquema no se incluye concentración de carga de los aerosoles. Adaptado del modelo obtenido del simulador FALL3D 8.0 (Prata et al., 2021).

Una fina lluvia de cenizas comenzó a caer esta tarde sobre el cielo frío, gris y nublado de Ciudad del Este, formando una plateada capa sobre los capots de los autos y sobre el pavimento, convirtiéndose en una inesperada atracción para los pobladores de la Triple Frontera (Última Hora, 2011).

(...) Medios digitales, tanto de Puerto Yguazú (Argentina), como de Foz de Yguazú (Brasil) reportaron el mismo fenómeno de la lluvia de cenizas, confirmando que afectaba a toda la región tri-fronteriza (Última Hora, 2011).

En Ciudad del Este, varias personas en las calles se dedicaron a tomar fotografías del inusitado fenómeno, que agregó una inesperada atracción a la tarde y noche invernal del martes de junio (Última Hora, 2011).

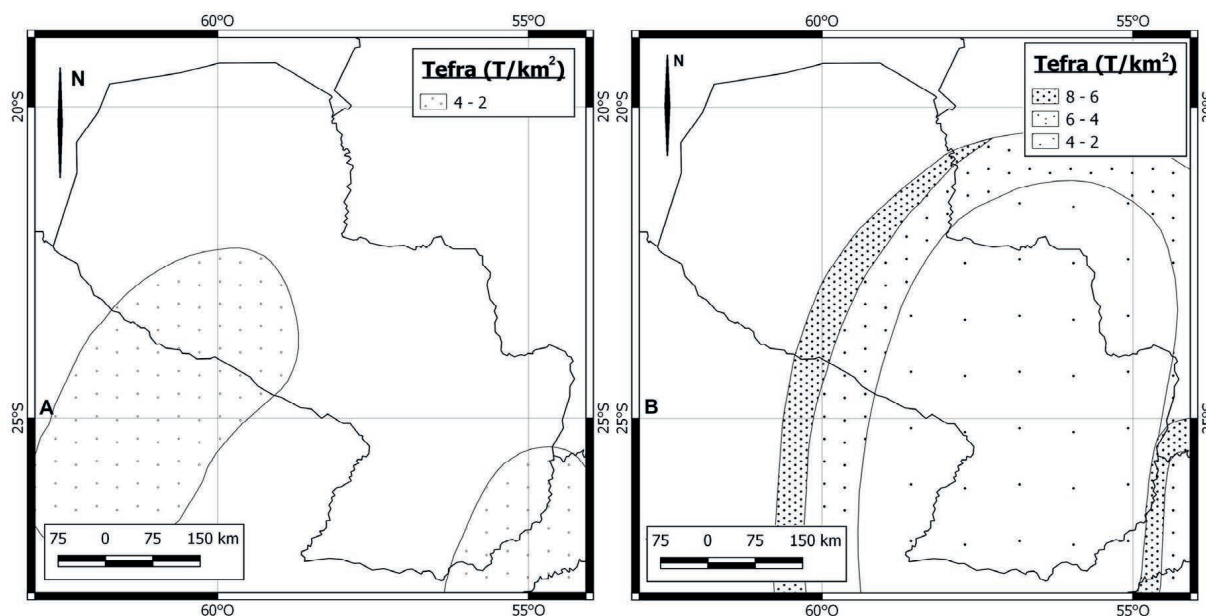


Figura 6. Cenizas volcánicas sobre Paraguay. **A.** Modelo de dispersión para el día 6 de junio a las 15:00 UTC por medio del simulador SEVIRI (Prata *et al.*, 2021). **B.** Dispersión de cenizas para el día 7 de junio a las 15:00 UTC por medio del simulador FALL3D8.0 (Prata *et al.*, 2021).

En relación a las actividades aeronáuticas, entre el 4 y el 14 de junio, numerosos vuelos fueron suspendidos en Paraguay, Uruguay, Chile, sur de Argentina y Brasil. Los dos aeropuertos principales de Buenos Aires y los de la Patagonia, el de Carrasco en Montevideo - Uruguay fueron clausurados por varios días. La pluma de cenizas continuó su deriva hacia el este y en la segunda mitad de junio y comienzos de julio numerosos vuelos fueron suspendidos en Nueva Zelanda, Australia y Sudáfrica (Wilson *et al.*, 2013)

El martes 7 de junio 2011, la aerolínea Gol informó de la suspensión de 19 vuelos para los destinos a Santiago, Buenos Aires, Córdoba, Rosario, Montevideo, Asunción y Foz de Iguazú por causa de la presencia de nubes de cenizas volcánicas. Así también, la compañía TAM canceló vuelos a diferentes destinos en América de Sur (Laguna, 2011 en Gonçalves, 2017). En ese mismo día, los vuelos desde el aeropuerto Silvio Pettirossi de Asunción fueron suspendidos (ABC Color, 2011a).

Inicialmente, las aerolíneas que operan en nuestro país comunicaron la interrupción de sus vuelos a Buenos Aires, Argentina; pero ahora la cancelación de los vuelos alcanza a Sao Paulo Brasil. El servicio, según explicaron, será reactivado una vez que sean superados los inconvenientes provocados por las cenizas del volcán en gran parte del centro y sur del continente. La compañía aérea TAM suspendió sus vuelos de la ruta aérea Asunción-São Paulo Brasil, y desde Asunción a Santa Cruz, Bolivia y viceversa debido a la presencia de ceniza volcánica en el aire. Los aviones que estaban en el aire durante el fenómeno fueron hasta sus aeropuertos alternativos, explicaron (ABC Color, 2011b).

En ese sentido, desde monitoreos meteorológicos reportaron lo siguiente:

Estamos graficando la presencia de cenizas volcánicas que generó una pluma sobre Paraguay. Ahora se encuentra en la zona de Itapúa y el sur de Alto Paraná, pero cruzó sobre Ñeembucú, parte de Paraguari, sur del departamento Central, Misiones, Caazapá y Guairá (ABC Color, 2011a).

Y también se agregaba: (...) *la ceniza volcánica cruzó muy por arriba (cinco a ocho kilómetros de altura), lo que no generó un efecto directo pero sí indirecto ya que afectó a la aeronavegación. Todos los vuelos fueron suspendidos (...)* (ABC Color, 2011a).

3) Láscar. La erupción del 18 de abril 1993, 19:00 UTC

Para el referido volcán, esta fue su mayor erupción en los últimos 9.000 años. Se inició con una actividad precursora freática, seguida luego de horas por la expulsión de material incandescente y ceniza, consignada como erupciones vulcanianas. El día 19 a la mañana se observó una columna que alcanzó los 10.000 m, que posteriormente se elevó hasta los 16.000 m en el que se formó el primer flujo piroclástico. Al mediodía se produjo otra explosión, en la que el penacho se elevó hasta los 20.000 m con expulsión de bloques y nuevos flujos piroclásticos. La columna volcánica se mantuvo aproximadamente por 32 horas, caracterizada por una altura fluctuante que al menos en diez ocasiones fueron desarrolladas columnas que superaron los 10.000 m, y cuyo máximo de altura fue de 22.500 m (Gardeweg y Medina, 1994; Stern *et al.*, 2007).

Dispersión de cenizas.— La erupción envió una gran pluma de cenizas en la atmósfera y con la caída de cenizas se evacuaron los poblados aledaños. La dispersión de tefra se direccionó en sentido E – ESE del continente Sudamericano (Figura 7) que prosiguió por lo menos veinte días luego de la erupción y que afectó gran parte del NO argentino y que alcanzó la costa Atlántica (NASA, 1993; Viramonte *et al.*, 1995).

Repercusiones en Paraguay.— El evento tuvo gran repercusión en Paraguay. Según el resultado de la simulación en el Ash3d, el frente de cenizas ingresó en Paraguay el día 19 con prominencia de dispersión en el sur de la Región Oriental del Paraguay con una altitud en el rango de 16 a 20 km para el núcleo de mayor densidad. Para la fecha del 22 la pluma de menor densidad ocupó casi toda la atmósfera del país a una altura de 4-6 km, mientras la nube de mayor espesor se desplazó hacia el este (Figura 8).

Así también, el día 21 de abril se ha reportado depósitos de caída en Asunción, en su área metropolitana y en gran parte del país (ABC Color, 1993), episodio de esta naturaleza que tal vez sea el más recordado en los

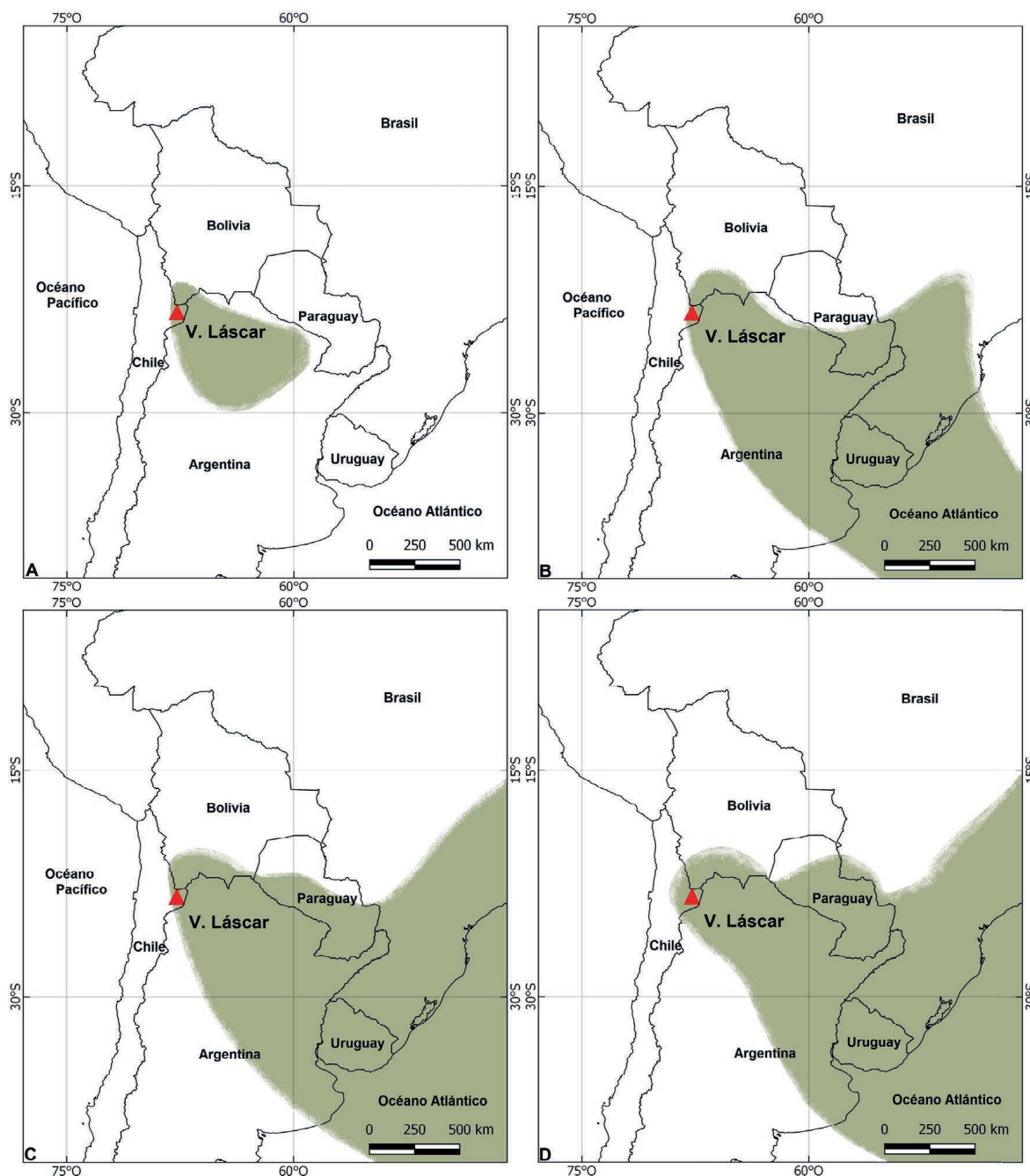


Figura 7. Esquema de dispersión de cenizas. Resultado de simulación con Ash3d utilizando los siguientes parámetros: fecha y hora de inicio: 19 abril 1993 23:00 UTC; duración de simulación: 120 horas; duración de erupción: 2 horas; altura de pluma: 21 km; volumen expulsado: 0,00344 km³ (no especificado). **A.** 19 de abril 1:00 am **B.** 20 de abril 01:00 am **C.** 21 de abril 11:00 am **D.** 22 de abril 05:00 pm.

últimos tiempos a nivel local. El Smithsonian Institute estimó la caída de 1 mm de ceniza sobre un área aproximada de 20.000 km², y más de 850.000 km² que incluyen regiones del centro-norte de Argentina, sur de Paraguay, Uruguay y sur de Brasil que fueron cubiertos por una fina capa (<0.1 mm) de depósitos de cenizas (Global Volcanism Program, 1993).

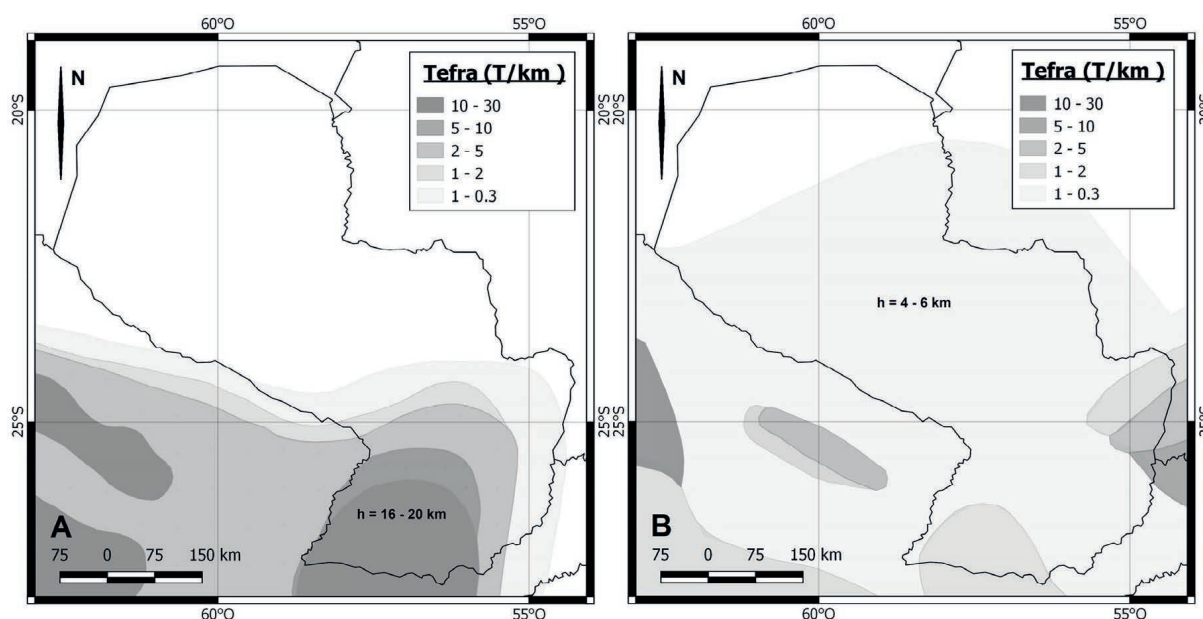


Figura 8. Modelo de distribución de tefra en la atmósfera de Paraguay obtenido por el Ash3d. **A.** Ingreso de cenizas en el país el 19 de abril 08:53 am. Los aerosoles de mayor densidad se observan en los departamentos de Ñeembucu, Misiones, Itapua. La región central y sur de la Región Oriental se encuentran con cenizas de densidades variables **B.** Para la fecha 22 abril 17:00 el núcleo de mayor densidad fue desplazado hacia el Brasil. Casi todo el país fue cubierto por una nube de tefra de baja densidad.

Se cuenta con un registro periodístico de fecha 22 de abril de 1993, cuyo contenido en su encabezado expresaba lo siguiente:

La presencia de un polvo de color ceniza que cubrió prácticamente todo, motivó una situación de curiosidad y alarma en gran parte del territorio nacional. El fenómeno natural procede del volcán chileno Láscar, que se encuentra en actividad desde el lunes último.

A primeras horas de la mañana de ayer (21 de abril) se verificó un efecto jamás visto en nuestro país, puesto que el viento preponderante trajo consigo unas pequeñas partículas muy finas de color ceniza (Figura 9). Este fenómeno llamó la atención de los habitantes, quienes desconocían la verdadera procedencia y los efectos que podría causar este extraño material que es muy semejante a granos de arena, pero más finos.

A fin de conocer con precisión las razones de este inusual hecho, consultamos con el vice ministro de Minas y Energía del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC), Dr. Juan H. Palmieri, quien explicó que se trataba de cenizas volcánicas provenientes de la activación del volcán de Láscar de Chile.

Sobre el punto señaló que estas cenizas salieron a la atmósfera a través de la presión que viene del subsuelo del volcán en forma de gases. “Un fuerte viento proveniente del suroeste fue el que trasladó estas cenizas desde Chile hasta nuestro país”, agregó (...)



Figura 9. Caída de cenizas volcánicas en Asunción. Imagen de ABC Color (1993).

Paraguay se encuentra en una zona de mucha estabilidad cortical, no tenemos ese tipo de problemas, pero sí ocurren algunos fenómenos de este tipo, cuando se dan condiciones climáticas como las que se han prestado en este momento con vientos predominantes del sureste y precipitaciones que obligan a las partículas de cenizas a descender (ABC Color, 1993).

3.e) La erupción del 20 de julio 2000, 14:44 UTC

Luego de una actividad eruptiva de más de cuatro horas fue desarrollado un penacho de 10 a 11 km. Esta manifestación fue clasificada como vulcaniana, la cual tuvo dos pulsos eruptivos principales. Por el color gris oscuro que presentaba la columna de gases y cenizas se dedujo que contenía gran cantidad de piroclastos (Aguilera *et al.*, 2003; Global Volcanism Program, 2000).

Dispersión de cenizas.— Luego de la primera erupción la columna presentaba un aspecto de hongo, que posteriormente fue disipada hacia el E-NE (Figura 10) en consecuencia a la dirección predominante de los vientos. Depósitos de cenizas de escasos milímetros fueron reportados en los puestos fronterizos de Chile – Argentina, en el poblado de Jama. Al día siguiente estos depósitos fueron removilizados por acción del viento (Aguilera *et al.*, 2003; Felpeto, 2001).

El Volcanic Ash Advisory Centre (VAAC) de Washington emitió una alerta de ceniza a las 19:09 UTC para un frente de ceniza que se extendía hacia el este, desde el norte de Chile, cruzando el sur de Bolivia y el norte de Argentina hasta el oeste de Paraguay central. En ese momento la columna se desplazaba a una velocidad de 130 km/h en altitudes de 10,7 y 13,7 km con un ancho de nube de 103 km (Global Volcanism Program, 2000).

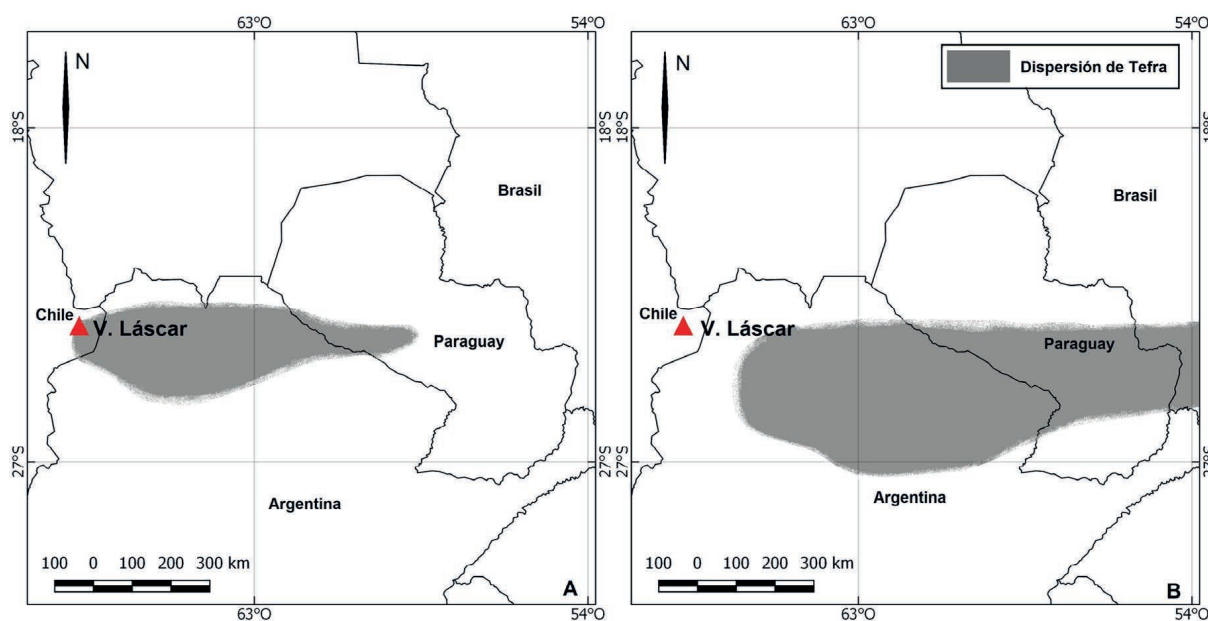


Figura 10. Modelo de dispersión de cenizas obtenida por medio del simulador Ash3d utilizando los siguientes parámetros: fecha y hora de inicio: 20 de julio 2000 14:10 UTC; lapso de dispersión: 96 horas; duración de erupción: 2 horas; altura de pluma: 11 km; volumen expulsado: 0,015 km³ (no especificado). **A.** 20 de julio 16:34 UTC. **B.** 21 de julio 12:34 UTC.

Repercusiones en Paraguay.— Este evento no tuvo las mismas repercusiones de aquella ocurrida en el año 1993. No se han reportado depósitos de caída, lo cual no implica que esto no haya acontecido. Se ha sabido del ingreso del frente de cenizas por medio de las observaciones en imágenes satelitales realizadas luego de la erupción del 20 de julio (Figura 11) (Felpeo, 2001).

4) Quizapú. La erupción del 10 de abril de 1932, 17:15 UTC

Esta erupción, de carácter pliniano, fue el evento volcánico de mayor magnitud que cualquier otro ocurrido en el siglo XX en la zona andina. La columna eruptiva, según cálculos, alcanzó una altura de 25 a 32 km y su índice de explosividad volcánica fue de 5; evento que generó un impacto muy perjudicial en el medio ambiente, en el que fallecieron miles de animales vacunos, caprinos y silvestres por la caída de la ceniza. La dispersión de tefra cubrió un tercio del territorio argentino, y un evento similar al de 1932 podría resultar catastrófico en la actualidad (Hildreth y Drake, 1992 en Rebolledo, 2022; Stern *et al.*, 2007; Tilling, 2009).

El conducto volcánico de Quizapú fue establecido luego de la erupción, con un cráter de 600 a 700 m de abertura y 150 m de profundidad. Según estimaciones, durante esta erupción fueron eyectados 9,5 km³ de tefra dacítica (Rovere *et al.*, 2012; Rebolledo, 2022).

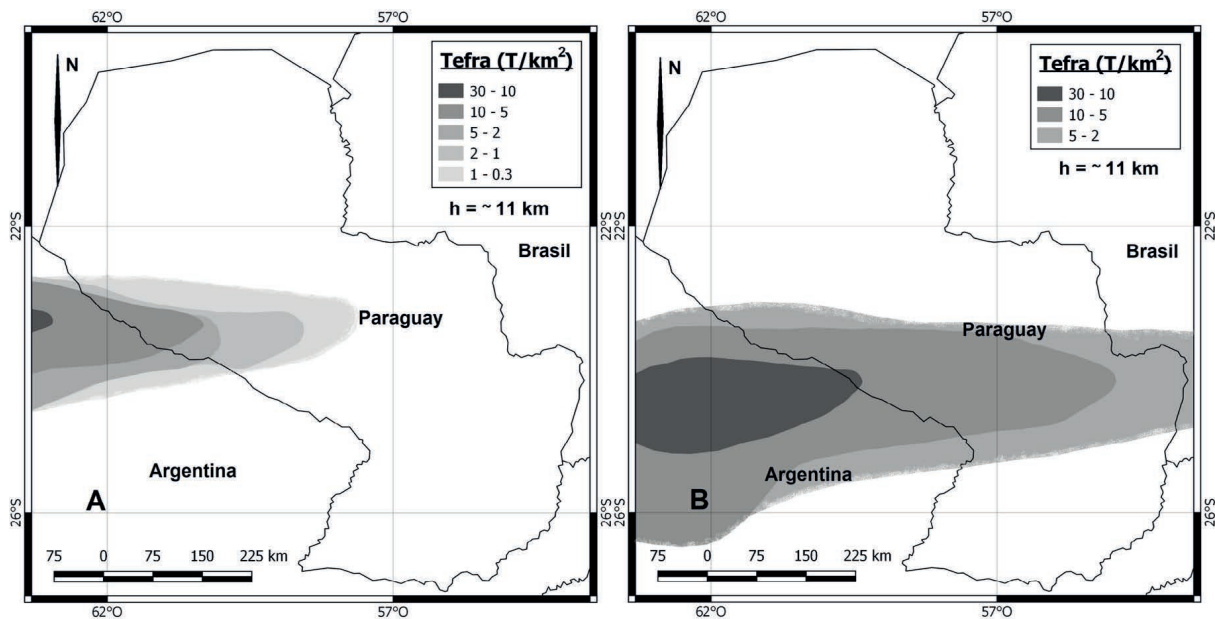


Figura 11. Dispersión de cenizas en la atmósfera de Paraguay según el modelo Ash3d. **A.** Ingreso de aerosoles desde el oeste hacia el centro del Chaco paraguayo el 20 de julio a las 16:34 UTC. **B.** La nube de cenizas alcanza a la Región Oriental del Paraguay y el sur de Brasil día 21 de julio y continuó su desplazamiento hacia la costa Atlántica. La altitud de las cenizas alcanzó aproximadamente el valor de 11 km.

Dispersión de cenizas.— El origen de la actividad volcánica fue reportado a las 08:00 am con una columna de vapor blanco. Luego de dos horas, con las primeras erupciones la columna oscureció y fue formado un hongo que fue dispersado hacia el este alcanzado el territorio argentino. El 11 de abril se reportó lluvia de tefra en la ciudad de Buenos Aires, el 15 en Río de Janeiro (Figura 12) y el 22 las cenizas llegaron a Ciudad del Cabo en Sudáfrica (Rebolledo, 2022).

Repercusiones en Paraguay.— En la tirada del 15 de abril de 1932, un medio de prensa escrita capitalino reportaba: (...) *sobre los cuatro horizontes de Asunción, una ligera neblina acusaba su presencia (...) una densa capa neblinosa cubría el cielo ciudadano (...). Asombro y dudas. (...) Impulsados por el viento sur de la noche anterior, llegaron hasta el Paraguay detritus volcánicos originados por las erupciones localizadas en la cordillera de los Andes* (El Diario, 1932).

Las cenizas cayeron en Asunción al mediodía del 14 de abril. Los árboles y la cancha de tenis del Club Deportivo Sajonia fueron cubiertos por cenizas (Figuras 13 y 14). En la misma fecha, en Villa Franca, departamento de Ñeembucu, reportaron presencia de cenizas: *una villa de cenizas a modo de densa neblina* (sic) (La Crítica, 1932).

El día 14 y 15 el horizonte fue oscurecido por la presencia de cenizas en forma de niebla, *que más tarde se cernía sobre nuestras cabezas en grises copos que pusieron una nota romántica en el paisaje otoñal. Era la lluvia de cenizas (...)* (El Orden, 1932).



Figura 12. Esquema de dispersión regional de tefra luego de la erupción del Quizapú en abril de 1932. Modificado de Rovere et al. (2012).

De Pilar. Desde el amanecer de hoy (el día 14 de abril) cae una finísima lluvia de cenizas, que de hora en hora se va haciendo más espesa (El Diario, 1932).

De la ciudad de Pilar nos telegrafía nuestro corresponsal, comunicándonos la alarma producida en aquella población por efecto de la caída de cenizas (El Orden, 1932).

De Tebicuary. En el mismo sentido que nuestro agente en Pilar se expresa el de Tebicuary.

De San Bernardino. De la vecina población lacustre nos escribe nuestro corresponsal: Desde hace cuatro días el pueblo y los alrededores de San Bernardino están envueltos en una tenue capa de humo blanquecino. Los aleros de las casas, lo mismo que las hojas de los árboles, se cubren de una pátina de polvo que suponemos no será otra cosa que las cenizas de los volcanes andinos. Hemos observado que, desde que se produjo el fenómeno, una gran cantidad de personas se hallan atacadas de constipación nasal e irritación en la garganta. Una señora inglesa, vecina de la localidad, nos aseguró que

en tiempo no lejano ocurrió un fenómeno parecido a este y que, como consecuencia, la agricultura sufrió un gran atraso y la vegetación de los bosques, disminuyó notablemente (El Orden, 1932).



Figura 13. Portada del periódico La Crítica su edición del 15 de abril de 1932. Se destaca en la primera línea del encabezado la caída de cenizas; y en el cuerpo de la sección principal de noticias el apartado.



Figura 14. Como noticia en destaque, la descripción breve del evento de la lluvia de cenizas en Asunción (La Crítica, 1932).

5) La erupción holocénica del Cerro Blanco (CVCB)

La actividad del CVCB se representa en diferentes épocas con sus niveles estratigráficos característicos definidos en tres sistemas: 1. Cortaderas (Pleistoceno Medio), que consta de ignimbritas riolíticas 1.1 Campo de la Piedra Pómez (Pleistoceno Superior), también con ignimbritas riolíticas y 1.2. Cerro Blanco (Holoceno), con extrusión de piroclastos lávicos riolíticos (Báez *et al.*, 2017)

Durante el último evento fue establecida la caldera del Cerro Blanco, con una explosión del tipo pliniano datado de 4.410 – 4.150 antes del tiempo presente. Dicha manifestación ha sido consignada como una de las mayores erupciones holocénicas de los Andes centrales y del mundo en aquel entonces (Báez *et al.*, 2017; Fernandez Turiel *et al.*, 2019).

Esta gran erupción riolítica generó depósitos que cubrieron un área aproximada de 500.000 km² depositando un volumen estimado mayor a 100 km³ de tefra. Estos valores señalan un Índice de Explosividad Volcánica de 7, superando así en violencia al evento del Krakatoa en 1883 (Fernandez Turiel *et al.*, 2019).

Dispersión de cenizas.— Los depósitos de caída superaron la distancia de 400 km desde el Complejo Volcánico del Cerro Blanco. (Fernandez Turiel *et al.*, 2019), por lo demás, no se cuenta con información adicional acerca del alcance global de la dispersión de cenizas.

Repercusiones en Paraguay.— Según las inferencias de Fernandez Turiel *et al.* (2019), capas alternantes de depósitos de lapilli y cenizas riolíticas plinianas han alcanzado el territorio paraguayo en la porción sur de la Región Oriental del Paraguay, en los departamentos de Ñeembucu, Paraguari, Misiones y parte de Itapua (Figura 15).

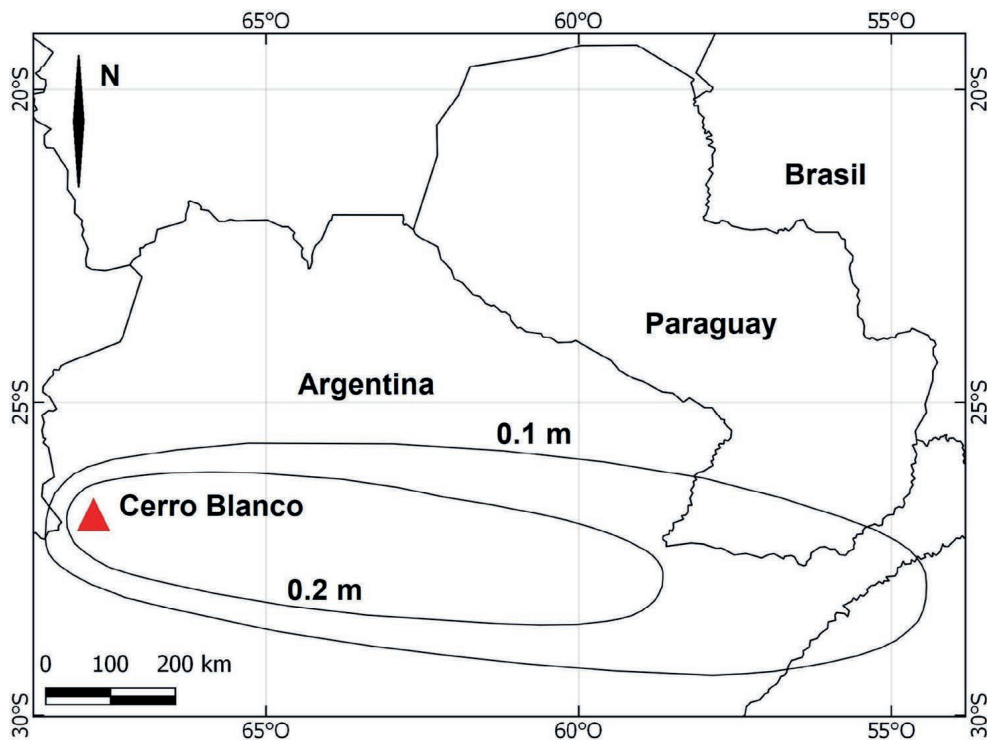


Figura 15. Mapa de isópacas (m) de depósitos inferidos de depósitos de caída para tefra de 0,1 y 0,2 m provenientes del Complejo Volcánico Cerro Blanco. Modificado de Fernandez Turiel *et al.* (2019).

DISCUSION

Considerando las motivaciones originales para investigar sobre este tema en particular, se sabía de tres eventos volcánicos andinos que incidieron de alguna forma en Paraguay en los últimos tiempos: el del Calbuco en el año 2015 y el del Puyehue en el 2011, acerca de los cuales existen algunos pocos artículos dispersos de la prensa escrita publicados en el tiempo de aquellos episodios y que actualmente son accesibles de manera digital.

Se sabía también de la lluvia de cenizas acaecida en Asunción y alrededores luego de la erupción del volcán Láscar en el año 1993, pero no se contaba con ningún tipo de documentación o registro. Cuando el profesor geólogo Ángel Spinzi supo de nuestra falta de información sobre lo ocurrido en abril de 1993, tuvo la gentileza de compartir una copia escaneada de un artículo en ABC Color en alusión a aquel evento. Ese hecho puntual sirvió como jalón definitivo para tomar la decisión de investigar y redactar un compendio sobre este tipo de manifestaciones naturales en nuestro país.

No se ha de negar la sensación de grata sorpresa en el transcurso de la investigación al enterarnos de la existencia de otros eventos volcánicos que también afectaron a Paraguay, por mencionar: la erupción del volcán Láscar en el año 2000; la del Quizapú en 1932, y la del Cerro Blanco durante el Holoceno.

En ese sentido, lo que refiere a la erupción del Quizapú en 1932, se ha sabido de la llegada de las cenizas a Paraguay según el modelo de dispersión de Rovere *et al.* (2012), acerca del cual no se tenía ningún tipo de información en el plano local; pero sí una alusión a aquel episodio en una página extranjera en internet (Revisionistas, 2008) a los medios de prensa paraguayos de aquel entonces; por lo cual, se recurrió al archivo de la Biblioteca Nacional del Paraguay con el fin de comprobar por medio de artículos periodísticos antiguos si existieron repercusiones sociales en nuestro país luego de la erupción del Quizapú.

En la hemeroteca del mencionado repositorio, se ha accedido a las publicaciones de tres medios de prensa escrita del mes de abril de 1932: La Crítica, El Diario y La Opinión. En dichos medios, se ha corroborado publicaciones de noticias que concedieron amplio destaque a la llegada de las cenizas en Asunción y en diversos poblados en Paraguay, por lo cual fue posible incluir el evento de la erupción del Quizapú en este compendio.

Ante este hallazgo, se levantó la suspicacia acerca de la cantidad de veces que este tipo de situaciones ha experimentado Paraguay a lo largo de su historia como país y en su devenir geológico, de los cuales, si existen reportes, se desconocen o nunca fueron señalados y se perdieron en el tiempo.

Tal es así que se asume que este conteo de casos de eventos eruptivos que afectaron a Paraguay no refleja por lejos lo ocurrido en la realidad. Para asomarnos a esta idea, por ejemplo, como lo había manifestado la señora inglesa vecina de San Bernardino, cuando *aseguró que en tiempo no lejano ocurrió un fenómeno parecido a este* (El Orden, 1932).

La pregunta que cobra relieve es: ¿cuántas veces el Paraguay se vio afectado por estos eventos volcánicos? Los artículos remanentes de prensa escrita y los testimonios de pobladores no bastan para responder a tal pregunta, y queda la Tierra con su información cruda. Estos materiales depositados podrían ser rastreables de algún modo con estudios geológicos modernos. Asociando composiciones químicas de minerales y vidrios es posible correlacionar cenizas volcánicas en amplias regiones, además de conocer el volcán fuente de las cenizas (Nakagawa y Ohba, 2002).

Esta emisión de partículas en la atmósfera regional habrá ocurrido con mayor intensidad desde la configuración final de los arcos volcánicos andinos, lo cual sería posterior al inicio de la fase de subducción de la placa de Nazca, cuya actividad data del Cenozoico Superior. Se propone que el número de ocasiones en que los frentes de cenizas alcanzaron o atravesaron el territorio paraguayo resulta completamente incierto.

Los resultados obtenidos con los modelos en Ash3d

Se ha utilizado este simulador para los eventos del Calbuco y los del volcán Láscar. De tal forma a que el programa pueda ofrecer resultados, se requirió

del ingreso de los siguientes parámetros: fecha y hora de inicio de la erupción; lapso de dispersión (en días); duración; altura de la pluma y volumen expulsado. Estos datos fueron obtenidos de investigaciones anteriores para cada episodio eruptivo.

Por medio de estos modelados, fue posible obtener la secuencia cronológica de dispersión desde el inicio de cada erupción hasta la llegada al territorio paraguayo y su posterior distribución parcial en la atmósfera. Así también se ha accedido a datos altimétricos de las cenizas sobre Paraguay con sus densidades en toneladas por kilómetro cuadrado, que han sido expresados en mapas temáticos para cada suceso en particular.

La experiencia en Paraguay luego de la llegada de las cenizas

Los eventos que se consignan de mayor relevancia en esta investigación son aquellos que tuvieron mayor incidencia social. En ese sentido, aquellos episodios de patente caída de cenizas en centros urbanos, como en junio del 2011 en Ciudad del Este y la Triple Frontera provenientes del volcán Puyehue; y en los años 1993 y 1932 con las erupciones de los volcanes Láscar y Quizapú respectivamente, cuyas cenizas cayeron en Asunción y en otras localidades del interior del país. Algunas personas padecieron problemas de salud por el contacto con las cenizas ante el evento de 1932, como se testimonió anecdóticamente en el poblado de San Bernardino. En ese orden, a aquel evento volcánico que incidió en las operaciones normales de aeronavegación con la suspensión de vuelos en el aeropuerto Silvio Pettrossi luego de la actividad del volcán Puyehue en el año 2011.

En lo referente a los eventos del Láscar (2000) y Calbuco (2015), se ha comprobado por medio de imágenes satelitales el desplazamiento de frente de aerosoles que alcanzaron a Paraguay, pero no así caída de cenizas. Esto podría ser objeto de investigación futura.

Para explicar la gran erupción holocénica en la caldera del Cerro Blanco, se toma como asidero el trabajo de Fernandez Turiel *et al.* (2019) en el que se estima, por medio de su mapa de isopacas de depositación de cenizas, que estas alcanzaron a Paraguay y que fueron sedimentadas con un espesor aproximado de 0,1 m, especialmente en los departamentos de Ñeembucu, sur de Central, parte de Paraguari, Misiones e Itapua.

En el mapa geológico de Gómez Duarte (s.f.), sobre el Bosquejo Geológico de los Esteros de Ñeembucu en el departamento del mismo nombre, se observan extensas superficies cubiertas por cenizas volcánicas. Dichos materiales podrían ser estudiados para determinar la correspondencia o no con los modelos de depositación realizados por Fernandez Turiel *et al.* (2019) en relación al evento del Holoceno. En el mencionado episodio de caída, no es posible recurrir a testigos oculares ni reportes periodísticos, sino a estudios tefrogeoquímicos y tefrocronológicos.

Si bien es cierto que Paraguay tuvo experiencias de caídas de cenizas, hasta este tiempo, no se conoce (o no existe) un trabajo en el que se haya llevado a cabo un muestreo del material crudo, ni mucho menos realizado análisis químicos cualitativos-cuantitativos; ni tampoco demarcaciones de zonas de depósitos de caída. No obstante, esta investigación resulta como un despertar ante una realidad natural que ha ocurrido normalmente en Paraguay, y con seguridad, en el futuro se prestará mayor atención a estos eventos volcánicos para llevar a cabo estudios e investigaciones.

Riesgos relacionados a la actividad volcánica en Paraguay

En el riesgo volcánico los aspectos que se involucran son diversos, entre ellos, los flujos piroclásticos, lahars, bombas balísticas, lluvia de cenizas, etc. Si el Paraguay estuviese sometido a los efectos de uno de los mencionados, no sería otro que las cenizas volcánicas, acerca del cual existe antecedentes y que ha sido el motivo principal de discusión en este trabajo.

En el compendio de riesgos a desastres naturales en Paraguay, Oreggioni *et al.* (2016) incluyen a la dispersión de cenizas volcánicas en la atmósfera como un potencial elemento a causar perjuicios de alguna índole. Lo clasifican como *Eventos extremos no relacionados a eventos meteorológicos o climáticos*, y lo incluyeron como riesgo tomando en cuenta el incidente de la suspensión de vuelos el 7 de junio de 2011 luego de la erupción del Puyehue.

Así también Oreggioni *et al.* (2016), en relación al mismo evento, afirman la presencia de cenizas en gran parte de la Región Oriental del Paraguay. En los resultados de la simulación con Ash3d (Figura 6B) se comprueba que aproximadamente el 70% de la atmósfera del país contenía cenizas. Se ha reportado caída de cenizas en Ciudad del Este y la zona de la Triple Frontera. Así también, la geóloga Ana María Caballero asegura haber percibido un aire enrarecido en la zona de Paraguari en aquellos días.

En relación a la lluvia de cenizas, luego de la erupción del Quizapú en 1932, gran cantidad de personas en el interior del país reportaron cuadros sanitarios por el contacto con las cenizas (El Orden, 1932).

Para lo que pueda eventualmente ocurrir en el futuro, teniendo en cuenta lo expresado hasta este punto, se recomienda a la población evitar contacto con las cenizas si estas llegasen a precipitar, por los riesgos que implica para la salud humana.

El fenómeno natural del tipo volcánico del alcance o caída de cenizas en Paraguay es proporcional al sísmico en función a la distancia, en su carácter natural e impredecible. Cuando ocurren sacudidas violentas en los territorios argentinos y chilenos, en ocasiones, la propagación ondulatoria alcanza al territorio paraguayo, con sus consabidas derivaciones (Caballero, 2018). Este hecho ha ocurrido en el pasado con cierta frecuencia y no sería motivo de sorpresa en el futuro.

En resumidas cuentas, la dispersión de cenizas en la atmósfera representa un factor de riesgo para la aeronavegación. Si llueven cenizas, estas podrían afectar a las personas y al medio ambiente.

El aspecto geográfico y los vientos

En los resultados de esta investigación se ha comprobado que en los tiempos modernos, la afectación en Paraguay debido al alcance de la dispersión de tefra proviene principalmente de la Zona Volcánica Sur de los Andes, y en segundo término, de la Zona Volcánica Central, en la cual sobresale el volcán Láscar por su mayor actividad.

En los episodios observados, los frentes de cenizas atravesaron primeramente el territorio argentino (y el uruguayo) y luego llegaron a Paraguay. Argentina es el país que se interpone geográficamente entre Paraguay y la cordillera Andina, por lo cual, si las direcciones de los vientos son propicias y las trayectorias de las nubes de tefra se insinúan rectilíneas desde su fuente a Paraguay, la ruta aérea iniciará por Argentina.

Por lo observado para el volcán Láscar, a partir del momento de sus explosiones hasta la llegada en el territorio paraguayo los frentes de ceniza viajan menos tiempo (horas, un día). Esto se justifica por la cercanía de Paraguay con respecto a la Zona Volcánica Central. Las cenizas provenientes de la Zona Volcánica Sur tardan tres o cuatro días.

Según las simulaciones y reportes, excluyendo el evento del Cerro Blanco, luego de las erupciones de los volcanes analizados, la advección del viento para la nube de cenizas tuvo sentido directo hacia Paraguay desde sus fuentes menos para la dispersión del Puyehue, cuyo frente se direccionó hacia el este, y luego con un cambio de orientación se dirigió hacia Paraguay. De ello se deduce que las trayectorias de los frentes de tefra no necesariamente se desplazarán en línea recta, sino que también pueden presentar trayectorias sinuosas hasta su llegada a Paraguay.

Los depósitos de puzolanas

El posicionamiento geográfico de Paraguay con respecto al Cinturón Andino y sus volcanes reviste de importancia para la distribución de los depósitos de puzolana en el territorio paraguayo. Si luego de una erupción violenta en los Andes, los vectores del viento se orientan preferencialmente hacia el noreste (para un volcán en la Zona Volcánica Sur); y este-sureste (para un volcán en la Zona Volcánica Central), las cenizas llegarían a Paraguay, y si las condiciones atmosféricas fuesen dadas, podrían depositarse.

Resulta sugerente que numerosos depósitos de puzolana se localizan en los departamentos de Ñeembucu, Central y Paraguari; precisamente aquellos más cercanos al Cinturón Andino, los posicionados en la franja más occidental del Paraguay (sin incluir el Chaco paraguayo). Según Gómez

Duarte (s.f.), en el departamento de Ñeembucu existen extensas áreas con depósitos de cenizas volcánicas. Se podría afirmar, en estos términos, que estos departamentos representan el portal aéreo paraguayo para el ingreso de las cenizas volcánicas provenientes de los Andes.

En ese sentido, cabe señalar la presencia de numerosos depósitos de cenizas volcánicas conocidos como puzolanas que en la actualidad se utilizan como materia prima para la fabricación de cemento en la Industria Nacional de Cemento (INC). Estos yacimientos se emplazan de forma lenticular en los departamentos de Ñeembucu, Paraguari y Central e Itapua, en las localidades de Ybytymi, Escobar, Acahay, Carapegua, Roque González, Nueva Italia y Salitre Cue (Gómez Duarte, s.f.; Wiens, 1993; Palmieri, 1994; Villalba, 2013; Báez, 2018).

Palmieri (1994) sostuvo que el origen de los depósitos puzolánicos del valle del Caañabe podría relacionarse con los volcanismos alcalinos cretácicos de los cerros Sarambi, Acahay, Sapucaí y Colonia Independencia. Así también Wiens (1993), señaló un retrabajamiento de puzolanas cretácicas para describir el origen de los lentes de cenizas en Ybytymi. Aunque estos argumentos son inciertos, aquí también se agrega como posibilidad, que los depósitos de caída provenientes de los volcanes chilenos podrían constituir la fuente de los yacimientos de puzolana, en consideración a los resultados preliminares y someros delineados en esta investigación.

Otras preguntas serían: ¿en cuántas ocasiones la atmósfera paraguaya ofició de corredor para frentes de cenizas provenientes de erupciones volcánicas de otras latitudes, aun de aquellas muy lejanas, de otras épocas geológicas, o en el tiempo presente y con recursos de monitoreo moderno, y fueron inadvertidas? ¿Alguna vez fueron depositadas cenizas, en el territorio paraguayo, provenientes del Pinatubo, del Tambora, del Etna, de algún volcán centroamericano, de Alaska o de alguna otra parte del globo?

En relación a las puzolanas orgánicas de Ybytymi mencionadas por Zarza (1991), el geólogo Gómez Duarte argumenta que la materia prima en forma de silicio para la construcción de las frústulas de las diatomeas provino primariamente de los volcanismos de épocas pasadas.

Telford *et al.* (2004) señala el incremento de colonias de diatomeas al momento de las caídas de tefra en ambientes lagunares y lacustrinos, aseveración que aplicada al contexto de los depósitos paraguayos explicaría el origen de las puzolanas orgánicas. Al final, la atención se dirige hacia la génesis volcánica de las puzolanas, y no es posible acceder a mayores detalles de fuentes y edades de estos materiales volcánicos sino se establecen correlaciones por medio de investigaciones y rastreos modernos.

Se propone aquí que existen cuantiosos depósitos de puzolana desconocidos en Paraguay. A modo de ejemplo, el geólogo Matías Tondo aduce la presencia en cantidades importantes de puzolana sobre los pisos del Precámbrico Sur (Río Tebicuary) que oficialmente no han sido reportados. En relación a aquellos lentes de cenizas ya conocidos (y algunos de ellos

explotados), se propone que todos se encuentran indiferenciados entre sí, en consideración a sus fuentes de proveniencia y edades.

Ante lo expresado, se manifiesta que no existe intención de sembrar confusión ni ambigüedades en lo referente al origen de los depósitos de puzolana en Paraguay, sino el de establecer en cierto modo observaciones sobre el estado de arte y un punto de partida para futuras investigaciones y así mejorar la comprensión acerca de estos rasgos geológicos.

CONCLUSIONES

Debido a sus efectos, se estima que las erupciones de los volcanes Puyehue (2011), Láscar (1993) y Quizapú (1932) son las de mayor representación en este compendio por el impacto en la sociedad paraguaya. Entre ellos especialmente el evento del Puyehue, en el cual sus cenizas coparon casi toda la atmósfera paraguaya causando problemas en las operaciones de aeronáutica y generando lluvias de tefra.

Los eventos del alcance o de caída de cenizas en Paraguay de origen volcánico, aunque no se experimentan con frecuencia a nivel local, se trata de una realidad natural. Esto ha ocurrido (y se esperan otros) en lapsos espaciados a lo largo de la historia geológica paraguaya. El número de ocasiones en las que Paraguay recibió cenizas volcánicas resulta hasta el presente indeterminado.

Las cenizas volcánicas que alcanzaron el territorio paraguayo corresponden a los volcanes pertenecientes a las Zonas Volcánicas Central y Sur. Las cenizas provenientes del volcán Láscar, por su cercanía, viajan menos tiempo para alcanzar la atmósfera paraguaya en comparación a los focos volcánicos localizados hacia el sur de Chile.

Los accesos aéreos al territorio paraguayo corresponden preferentemente a los departamentos de Ñeembucu, Central, Paraguari, Misiones e Itapua (para los eventos de la Zona Volcánica Sur); Boquerón y Presidente Hayes en el Chaco paraguayo (para los eventos de la Zona Volcánica Central). Aun así, no se ha demostrado que todas las veces que las nubes de aerosoles llegaron a Paraguay las cenizas precipitaron para formar depósitos.

Hacia el sur de la Región Oriental del Paraguay existen cuantiosos yacimientos de puzolana indiferenciados en su origen. Estos podrían provenir de los volcanes andinos, y al respecto, sólo será posible argumentar con seguridad luego de llevar a cabo investigaciones geológicas, petrológicas, tefrogeoquímicas, tefrostratigráficas y tefrocronológicas.

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Ángel Spinzi y al Lic. Adolfo Báez por sus materiales compartidos. Al Dr. Jaime Báez por sus sugerencias. A la geóloga Margarita Yegros por su contribución. A Gloria Ibañez por la coordinación de la publicación. A la estudiante M.A. Gadea por su colaboración en la edición de imágenes. Al estudiante de geología Pedro Benítez.

BIBLIOGRAFIA

- ABC Color. 1993. *Polvo volcánico cubrió ayer gran parte de nuestro país*. Edición del 22 de abril 1993. Página 23.
- ABC Color. 2011a. *Cenizas volcánicas están en Paraguay*. Edición del 7 de junio 2011. Recuperado de: <https://abc.com.py/internacionales/cenizas-volcanicas-estan-en-paraguay-267602.html>
- ABC Color. 2011b. *Paraguay aislado por las cenizas del volcán*. Edición del 8 de junio 2011. Recuperado de: <https://abc.com.py/internacionales/paraguay-aislado-por-las-cenizas-del-volcan-chileno-268095.html>
- Aguilera, F., Martínez, C., Tassi, F., Viramonte, J., Medina, E., Vargas, H. y Soto, I. 2003. Actividad del Volcán Láscar en el periodo 2000 – 2002. *10° Congreso Geológico Chileno*. Universidad de Concepción.
- Amat-Baeza, G. and Giesen, C. 2023. Human health effects of volcanic eruptions – a systematic review. *Qeios*, CC-BY 4.0.
- Amigo, Á. 2004. *Volcán Láscar: Aporte y dispersión de azufre oxidado a la atmósfera regional*. Informe Final GL69F. Tesis de Grado de Geólogo. Santiago de Chile. Universidad de Chile.
- Amigo, Á., Bertín, D. y Orozco, G. 2012. Peligros volcánicos de la zona norte de Chile. Carta Geológica de Chile. *Serie Geología Ambiental* N° 17.
- Antayhua, Y. y Tavera, H. 2003. *Volcanes y Sismicidad en la Región del Volcán Sanbancaya (Arequipa)*. Monografía. Instituto Geofísico del Perú, Centro Nacional de Datos Geofísicos. Lima, Perú.
- Báez, A. 2018. *Contribución al conocimiento de los materiales puzolánicos utilizados como aditivos activos en el cemento, CP – IV – 32*. Informe técnico, Industria Nacional de Cemento. Asunción, Paraguay.
- Báez, W., Arnosio, M., Chiodi, A., Ortíz-Yañes, A., Viramonte, J., Bustos, E., Giordano, G. y López, J. 2015. Estratigrafía y evolución del Complejo Volcánico Cerro Blanco, Puna Austral, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 32: 29-49.
- Báez, W., Chiodi, A., Bustos, E., Arnosio, M., Viramonte, J., Giordano, G. y Alfaro, B. 2017. Mecanismos de Emplazamiento y Destrucción de los Domos Lávicos asociados a la Caldera del Cerro Blanco, Puna Austral. *Revista de la Sociedad Geológica Argentina* 74(2): 223-238.
- Barros Gomes, C., Comin-Chiaramonti, P. and Velázquez, V. 2000. The Mesoproterozoic Rhyolite Occurrences of Fuerte Olimpo and Fuerte San Carlos, Northern Paraguay. *Revista Brasileira de Geociências* 30(4): 785-788.

- Bègue, N., Shikwambana, L., Bencherif, H., Pallotta, J., Sivakumar, V., Wolfram, E., Mbatha, N., Orte, F., Du Preez, D. J., Ranaivombola, M., Piketh, S., and Formenti, P. 2020. Statistical analysis of the long-range transport of the 2015 Calbuco volcanic plume from ground-based and space-borne observations. *Annales Geophysicae* 38: 395-420.
- Bertin, D., Amigo, A., Mella, M., Astudillo, V., Bertin, L. y Buchi, F. 2015. Erupción del volcán Calbuco 2015: Estratigrafía eruptiva y volumen involucrado. *XIV Congreso Geológico Chileno*. La Serena, Chile.
- Bitschene, P. and Báez Presser, J. 1989. The Asunción Alkaline Province (Eastern Paraguay): Geologic setting and petrogenetic aspects. *Zentralbl. Geol. Paläont.* 1(5-7): 959-971.
- Bonadonna, C. and Costa, A. 2013. Modeling tephra sedimentation from volcanic plumes. In: *The Physics and Mathematics of Volcanism*. Cambridge University Press (pp. 173-202).
- Casadevall, T. and Thompson, T. 1999. World map of volcanoes and principal aeronautical features. *Series 2700*. United States Geological Survey.
- Caballero, A. 2018. *Sismología del Paraguay*. Tesis de Grado de Licenciatura. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay.
- Del Pozo, A. y Mendiola, F. 2014. *Las Cenizas Volcánicas del Popocatepé y sus efectos para la Aeronavegación e Infraestructura Aeroportuaria*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Instituto de Geofísica, UNAM. 43-50 pp.
- De la Cerda, L. 1934. Volcán Quizapú. Expedición Científica del Observatorio del Salto, 9 al 13 de febrero de 1934. *Academia Chilena de Ciencias Naturales*. Imprenta Jordán.
- Dingwell, D., Lavallée, Y. and Kueppers, U. 2011. Volcanic ash: A primary agent in the Earth system. *Physics and Chemistry of the Earth* 45-46: 2-4.
- El Diario. 1932. *Lluvia de cenizas continúa hacia el norte*. Edición del 15 de abril 1932. Págs. 2. Hemeroteca de la Biblioteca Nacional del Paraguay.
- El Orden. 1932. *Notas de la Urbe*. Edición del 15 de abril 1932. Págs. 3 y 8. Hemeroteca de la Biblioteca Nacional del Paraguay.
- Felpeto, A. 2001. *Modelización Física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- Fernandez Turiel, J., Pérez, F., Rodríguez A., Saavedra, J., Carracedo, J., Rejas, M., Lobo, A., Osterrieth, M., Carrizo, J., Esteban, G., Gallardo, J. and Ratto, N. 2019. The large eruption 4.2 kcal BP in Cerro Blanco, Central Volcanic Zone, Andes: Insights to the Holocene eruptive deposits in the southern Puna and adjacent regions. *Estudios Geológicos* 75(1): e088.
- Forte, P., Domínguez, L., Bonadonna, C., Gregg, C., Bran, D., Bird, D. and Castro, J. 2018. Ash resuspension related to the 2011 – 2012 Cordón-Caulle eruption, Chile, in a rural community of Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 350: 18-32.

- Forte, P., Rodríguez, L., Jácome Paz, M. P., Caballero García, L., Alpízar Segura, Y., Bustos, E., Perales Moya, C., Espinoza, E., Vallejo, S. and Agosto, M. 2021. Volcano monitoring in Latin America: taking a step forward: Preface to Special Issue on Volcano Observatories in Latin America. *Volcanica* 4:(1): 7-33.
- Freire, S., Florczyk, A., Pesaresi, M. and Sliuzas, R. 2019. An Improved Global Analysis of Population Distribution in Proximity to Active Volcanoes, 1975–2015. *International Journal of Geo-Information* 8: 341.
- Fugarazzo, R., Gadea, M., Caballero, M., Assumpção, M.S. y Figueres, V. 2021. Las Zonas sísmicas en Paraguay. *Reportes Científicos de la FaCEN* 12(1): 10-20.
- Gardeweg, M. y Medina, E. 1994. La erupción subpliniana del 19-20 de abril de 1993 del volcán Láscar, N de Chile. 7° Congreso Geológico Chileno. *Actas* 1: 299-304.
- Gómez Duarte, D. (s.f.). *Bosquejo geológico de los esteros del Ñeembucu*. Informe técnico. Recuperado de: geologiadelparaguay.com.py/BosquejoGeologicodellosEsteros.pdf
- Gonçalves, A. 2017. *Análise do impacto provocado pelas cinzas vulcânicas no gerenciamento do tráfego aéreo: Estudo de caso do vulcão Puyehue*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense. Río de Janeiro, Brasil.
- Global Volcanism Program. 1993. Report on Lascar (Chile). In: Venzke, E. (Ed.). *Bulletin of the Global Volcanism Network* 18:4. Smithsonian Institution.
- Global Volcanism Program. 2000. Report on Lascar (Chile). In: Wunderman, R. (Ed.). *Bulletin of the Global Volcanism Network* 25:6. Smithsonian Institution.
- Grob, E., Oyarzún, M., Cavieres, I., Zarges, P. y Bustamante, G. 2012. ¿Son las cenizas volcánicas un riesgo para la salud respiratoria? Revisión a propósito de la erupción del cordón del Caulle en junio de 2011. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias* 28: 294-302.
- Guzmán, S., Grosse, P., Martí, J., Petrinovic, I. y Seggiaro, R. 2017. Calderas Cenozoicas Argentinas de la zona Volcánica Central de los Andes – Procesos Eruptivos y Dinámica: Una Revisión. Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. *Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino*. Tucumán.
- Hellweg, M. 1999. Seismic signal from Lascar volcano. *Journal of South American Earth Sciences* 12(2): 123-133.
- Jónsdóttir, A. 2011. Impact of Eyjafjallajökull on tourism and international flights. 10 einingaritgerð sem erhlutiaf Baccalaureus Scientiarum gráðu í ferðamálafræði. Líf og umhverfivísindadeild Verkfræði- og náttúruvísindasvið Háskóli Íslands.
- Kenedi, C., Brantley, S., Hendley II, J. and Stauffer, P. 2000. Volcanic Ash Fall—A “Hard Rain” of Abrasive Particles. *U.S. Geological Survey David A. Johnston Cascades Volcano Observatory*.

- Koffman, B., Dowd, G., Osterberg, E., Ferris, D., Hartman, L., Wheatley, S., Kurbatov, A., Wong, G., Markle, B., Dunbar, N., Kreutz, k. and Yates, M. 2017. Rapid transport of ash and sulfate from the 2011 Puyehue-Cordón Caulle (Chile) eruption to West Antarctica. *JGR Atmospheres* 122(16): 8367-8966.
- Kulánek, O. 1990. *Anatomy of seismograms*. Seismological Section, University of Uppsala, Uppsala, Sweden. 177pp.
- La Crítica. 1932. *Las cenizas en Asunción*. Portada de la edición del 15 de Abril. Año 4 número 973. Pág. 1. Hemeroteca de la Biblioteca Nacional del Paraguay.
- Lara, L., Amigo, A., Silva, C., Orozco, G. y Bertin, D. 2012. La erupción 2011-2012 del Cordón Caulle: antecedentes y rasgos notables de una erupción en curso. *XII Congreso Geológico Chileno* 531-533. Antofagasta, Chile.
- Lechner, P., Tupper, A., Guffanti, M., Loughlin, S. and Casadevall, T. 2017. Volcanic Ash and Aviation—The Challenges of Real-Time, Global Communication of a Natural Hazard. *Advances in Volcanology* 51-54. Springer International Publishing.
- Lettino, A., Caggiano, R., Fiore, S., Macchiato, M., Sabia, S. and Trippetta, S. 2012. Eyjafjallajökull volcanic ash in southern Italy. *Atmospheric Environment* 48: 97 – 103.
- Martinic, M. 2008. Registro histórico de antecedentes volcánicos y sísmicos en la Patagonia austral y la Tierra del Fuego. *Magallania* 36(2): 5-18.
- Mella, M., Moreno, H., Vergés, A., Quiroz, D., Bertin, L., Basulato, D., Bertin, D. y Garrido, N. 2015. Productos volcánicos, impactos y respuesta a la emergencia del ciclo eruptivo abril-mayo del volcán Calbuco. *XIV Congreso Geológico Chileno* 98 – 101. La Serena, Chile.
- Miraglia, L. 1965. Vulcanismo Postpliocénico del Paraguay. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay* 7: 1-52.
- Moran, D., Merchan, W., Rodriguez, E., Mulas, M. and Hernik, P. 2023. Long-range transport and microscopy analysis of Sangay volcanic ashes in Ecuador. *Air Quality, Atmosphere & Health* 17: 155-175.
- Moreno, H. y Petit-Breuilh, E. 1998. El Complejo Volcánico Puyehue – Cordón Caulle, Andes del Sur (40.5° S): Características Geológicas y Erupciones Históricas. *5º Congreso de Ciencias de la Tierra, Actas de la Conferencia Internacional “Sistemas modernos de preparación y respuesta ante riesgos sísmicos, volcánicos y tsunamis”*. Santiago, Chile.
- Nakagawa, M. and Ohba, T. 2002. Primary Minerals and Volcanic Glass. *Global Environmental Research* 6: 41-51.
- NASA. 1993. *Earth from Space – Image Information*. Recuperado de: <http://nasa.gov/eol.jsc.nasa.gov/Collections/EarthFromSpace/printinfo.pl?PHOTO=STS055-151-58>
- NASA Earth Observatory. 2015. *Tracking the Sulfur Dioxide from Calbuco*. Recuperado de: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/85791/tracking-the-sulfur-dioxide-from-calbuco>

- NASA's Goddard Space Flight Center. 2016. *Tracking Volcanic Ash With Satellites*. Recuperado de: <https://svs.gsfc.nasa.gov/12221/>
- Newhall, C. and Self, S. 1982. The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Journal of Geophysical Research* 87(2): 1231-1238.
- Oreggioni, F., Báez, J., Sánchez, J., Álvarez, V. y Colmán, E. 2016. Guía Metodológica para el Análisis de Eventos Extremos en el Paraguay. *IX Plan de Acción DIPECHO para América del Sur 2015-2016*. Asunción, Paraguay.
- Otero, L., Ristori, P., Pallotta, J., Pawelko, E., D'Elia, R. y Quel, E. 2012. Volcán Puyehue – Cordón Caulle: medición de las cenizas en Buenos Aires, Argentina, durante junio 2011. *Pyroclastic Flow, Journal of Geology* 2(2).
- Palmieri, J. 1994. Depósitos de puzolana en el Paraguay. *ABC Color*. Suplemento Económico. Edición del 20 de marzo 1994. Recuperado de: <https://www.geologiadelparaguay.com.py/Depositos-de-Puzolana-en-Paraguay.htm>
- Pérez, G. 2020. *Estudio de Estructuras Magmáticas bajo el Volcán Láscar Mediante Datos de Magnetotelúrica y Geodesia*. Tesis de Maestría. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Prata, F. and Rose, B. 2015. Volcanic Ash Hazards to Aviation. *The Encyclopedia of Volcanoes*. Chapter 52: 911-934.
- Prata, A., Mingari, L., Folch, A., Macedonio, G. and Costa, A. 2021. FALL3D-8.0: a computational model for atmospheric transport and deposition of particles, aerosols and radionuclides – Part 2: Model validation. *Articles* 14(1).
- Pritchard, M. and Simons, M. 2002. A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the Central Andes. *Nature* 418: 167-170.
- Proyecto PAR 83/005. 1986. *Mapa Geológico del Paraguay*. Texto. Comisión Nacional de Desarrollo Regional. Ministerio de Defensa Nacional. Asunción, Paraguay. 270 pp.
- Rebolledo, A. 2022. *Dinámica de las erupciones de 1846 y 1932 del volcán Quizapú: Parámetros eruptivos y ascenso del magma en el conducto*. Tesis de Grado de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Reckziegel, F., Arango, E. y Viramonte, J. 2019. *Ceniza volcánica: Dispersión y caída. Impactos, riesgos y mitigación*. *Temas de Biología y Geología del NOA* 9(3): 72-83.
- Revisionistas. 2008. *Lluvia de ceniza sobre Buenos Aires*. Disponible en: <http://www.revisionistas.com.ar/?p=23004>
- Romero, J., Mella, M., Swanson, F., Crisafulli, Ch., Jones, J., González, M., Lara, A., Morgavi, D., Arzilli, F., Clavero, J. y Reckziebel, F. 2017. La erupción del volcán Calbuco en 2015: Volcanología, sociedad y ecosistemas. *Centro de Investigación y Divulgación de Volcanes de Chile*.

- Rovere, E., Violante, R., Rodríguez, E., Osella, A. y De la Vega, M. 2012. Aspectos tefrológicos de la erupción del volcán Quizapú de 1932 en la región de la laguna Llanquanelo, Payenia (Mendoza, Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 19: (2).
- Rovira, A., Rojas, C. y Diez, S. 2013. Efectos de una erupción volcánica Andina. El caso del Cordón Caulle, Sur de Chile (2011). *IGF-Forschungsberichte* (Instituts für Interdisziplinäre Gebirgsforschung [IGF]) (Institute of Mountain Research) 5: 288-304.
- Segura, A. 2016. *Erupción Subpliniana de Abril de 2015 del Volcán Calbuco, Andes del Sur: Génesis, Dinámica y Parámetros Físicos de la Columna Eruptiva y Depósitos Piroclásticos de Caída Asociados*. Tesis de Grado de Geóloga. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Scott, E. 2021. Origins and Characteristics of Tephra Deposits. *Enciclopedia of Geology* 6.
- Sellés, D. y Moreno, H. 2011. Geología del volcán Calbuco, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica* 130: 38 pp.
- Serra, M. 2017. *Quironómidos (Insecta: díptera; chironomidae) subfósiles como indicadores de cambios climáticos y eventos geológicos de disturbio en sedimentos de lagos andinos de Patagonia Norte*. Tesis Doctoral. Universidad del Comahue. Neuquén, Argentina.
- Shaller, N., Griesser, T., Fisher, A., Stickler, A. and Brönnimann, S. 2009. Climate effects of the 1883 Krakatoa eruption: Historical and present perspectives. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich* 154(1-2): 31-40
- Stern, Ch. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile* 31(2): 161-206.
- Stern, Ch., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J., Lara, L., Naranjo, J., Parada, M. and Skewes, A. 2007. Chilean volcanoes. *The Geology of Chile*. Chapter 5. Geological Society of London.
- Steward, C., Damby, D., Hornwell, C., Elias, T., Ilyinskaya, E., Tomašek, I., Bernadette, L., Schmidt, A., Krage, H., Baxter, P., Cronin, S. and Witham, C. 2022. Volcanic air pollution and human health: recent advances and future directions. *Bulletin of Volcanology* 84: 11.
- Telford, R., Barker, P., Metcalfe, S. and Newton, A. 2004. Lacustrine responses to tephra deposition: examples from Mexico. *Quaternary Science Reviews* 23: 2337-2353.
- Tilling, R. 2009. Volcanism and associated hazards: *The Andean perspective*. *Advances in Geosciences* 22: 125-137.
- Tilling, R. 2014. Volcanic Hazards. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, pp 559-577.
- Última Hora. 2011. *La nube volcánica avanza en Paraguay y cubre zonas de Ciudad del Este*. Edición del 7 de junio 2011. Recuperado de: <https://>

www.ultimahora.com/la-nube-volcanica-avanza-paraguay-y-cubre-zonas-ciudad-del-este-n435479

- Última Hora. 2015. *Cenizas Volcánicas de Chile Llegaron a Encarnación*. Edición del 25 de abril 2015. Recuperado de: <https://www.ultimahora.com/cenizas-volcanicas-chile-llegaron-encarnacion-n891081>
- van Geffen, J., Van Roozendaal, M., van Gent, J., Valks, P., Rix, M., van der A., R., Coheur, P., Clarisse, L. and Clerboux., C. 2009. An Alert System for Volcanic SO₂ Emissions Using Satellite Measurements. 2009 *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*.
- Vergara-Jara, M., Hopwood, M., Browning, T., Rapp, I., Torres, R., Reid, B., Atchterberg, E. and Iriarte, J. 2021. A mosaic of phytoplankton responses across Patagonia, the southeast Pacific and the southwest Atlantic to ash deposition and trace metal release from the Calbuco volcanic eruption in 2015. *Articles* 17:(2).
- Villalba, T. 2013. *Caracterización del origen y uso de puzolana localizada en las cercanías de Carapegua, Departamento de Paraguari*. Tesis de Grado de Geóloga. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay.
- Viramonte, J., Seggiaro, R., Becchio, R. y Petrinovic, I. 1995. *Actividad Eruptiva del Volcán Láscar – 1993*. Primer Informe. Instituto Geonorte – UNSa.
- Wiens, F. 1993. *Análisis de material puzolánico en el Paraguay Oriental*. Cooperación técnica paraguayo-alemana. N° Proyecto 88.2202.5.
- Wilson, T., Steward, C., Bickerton, H., Baxter, P., Outes, V., Villarosa, G. and Rovere, E. 2013. Impacts of the June 2011 Puyehue-CordónCaulle volcanic complex eruption on urban infrastructure, agriculture and public health. *GNS Science Report* 2012/20
- Zarza, P. 1991. *Estudo das pozolanasnaturais de Ybytimi - La Colmena, Paraguai oriental*. Tesis de Maestría. Rio Claro. São Paulo, Brasil.