

Tormentas de ceniza volcánica en Patagonia: un peligro latente y subestimado

Pablo Forte¹, Lucia Domínguez², Costanza Bonadonna², María Clara Lamberti^{3,4}, Chris E. Gregg⁵, Donaldo Bran⁶ y Jonathan M. Castro¹

¹ Instituto de Geociencias, Universidad Johannes Gutenberg, Mainz, Alemania – fortep@uni-mainz.de

² Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Ginebra, Suiza

³ GESVA, Departamento de Ciencias Geológicas, FCEN, Universidad de Buenos Aires, Argentina

⁴ IDEAN (UBA-CONICET), Buenos Aires, Argentina

⁵ Departamento de Geociencias, Universidad East Tennessee State, Estados Unidos

⁶ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina

Palabras clave: Tormentas de ceniza, resuspensión ceniza volcánica, Patagonia argentina

INTRODUCCIÓN

Una tormenta de ceniza volcánica puede definirse como un evento de remobilización masiva de ceniza volcánica (<2mm) a partir de la acción eólica (via suspensión, saltación y reptaje). Si bien los primeros reportes sobre tormentas de ceniza volcánica se remontan a principios del siglo XX, asociados a la resuspensión de los depósitos producidos por la erupción de Novarupta (Alaska) en 1912, no fue hasta comienzos de este siglo que el estudio de este peligro volcánico comenzó a adquirir relevancia en la comunidad volcanológica. Pero, ¿a qué nos referimos exactamente cuando hablamos de resuspensión de ceniza volcánica? Bajo determinadas condiciones meteorológicas y ambientales, como vientos intensos, baja humedad de suelos y falta de cobertura vegetal, las partículas volcánicas pueden ser desprendidas de la superficie y puestas nuevamente en suspensión en la atmósfera. Para que esto ocurra, el umbral de velocidad friccional -el cual depende de las características texturales y morfológicas de las cenizas (tamaño de grano, densidad, rugosidad superficial, grado de compactación) y de las condiciones de la superficie (rugosidad y humedad)-, debe ser superado. La remobilización de ceniza puede ocurrir tanto a escala local como regional, pudiendo en el segundo de los casos dar lugar a la configuración de tormentas de ceniza masivas que afecten áreas ubicadas incluso a cientos de kilómetros de la fuente de depositación primaria. A diferencia de la caída de ceniza primaria, este fenómeno no tiene una fuente de emisión puntual (centro eruptivo o cráter) y puede ocurrir tanto en depósitos frescos como antiguos (cientos a miles de años).

Existen algunas regiones en el Hemisferio Norte, como Islandia y Alaska, donde la ocurrencia de tormentas de ceniza volcánica es registrada con frecuencia. Es también en estas zonas donde se han concentrado la mayor cantidad de esfuerzos para la caracterización y monitoreo de estos eventos. En particular, en Islandia los eventos de resuspensión

después de la erupción de Eyjafjallajökull en 2010 levantaron la señal de alarma respecto al impacto que la exposición prolongada a estos eventos puede tener en la salud humana; y se han dado los primeros pasos para modelar este fenómeno. En el caso de Alaska, la resuspensión de material volcánico depositado por la erupción del Novarupta en 1912 (~28 km³) sigue siendo un problema para las comunidades en la isla de Kodiak, localizadas ~ 250 km al SE del volcán. Por este motivo, el observatorio volcanológico de Alaska (USGS-AVO) concentra sus esfuerzos en el monitoreo de este fenómeno.

Si bien en el hemisferio Sur estos eventos también han sido reportados, la atención que han suscitado es aún incipiente. Asociado a la presencia del frente volcánico activo de los Andes y los depósitos que su actividad genera, se han detectado eventos de resuspensión de ceniza en las regiones de Puna y Patagonia. En particular, en la Patagonia argentina durante las últimas décadas se ha observado remobilización eólica de los depósitos de las erupciones de los volcanes Hudson (1992), Chaitén (2008-2010), Cordón Caulle (2011-2012) y Calbuco (2015) (ej., Wilson et al., 2011; Reckziegel et al., 2016; Forte et al., 2017); todos ellos emplazados en los Andes chilenos.

La presente contribución busca aportar nuevas evidencias sobre la importancia de este fenómeno en la Patagonia y la necesidad de contemplarlo dentro de los esquemas de reducción de riesgo de desastre. Con este fin, se han examinado los avances realizados por diversos autores que trabajaron en la zona desde la erupción del volcán Hudson en 1991 hasta la actualidad, combinándolos con datos propios de investigaciones en curso, principalmente en la zona afectada por la erupción de Cordón Caulle en 2011-2012. Utilizando herramientas tanto de las ciencias sociales como naturales, se aborda el estudio de la fenomenología, dinámica e impacto en las comunidades de este peligro volcánico - subestimado- en la región patagónica.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

La región patagónica presenta una importante heterogeneidad longitudinal tanto geomorfológica como climática. En el extremo occidental se encuentra la Cordillera de los Andes del Sur, un relieve montañoso de 2000 m s.n.m. de altura promedio, una extensión N-S de 2200 km, y cubierta por el Bosque Andino Patagónico. El frente volcánico activo se superpone con este sector cordillerano. En progresión hacia el Este se encuentra la Precordillera, conformada por cordones montañosos, sierras y colinas. Más al Este, la estepa patagónica exhibe un paisaje de sierras, colinas, pedimentos mesetiformes y mesetas basálticas, acompañado por vegetación arbustiva baja y pastizales. La franja más oriental está constituida por la costa Patagonia. Por otro lado, la región presenta dos gradientes climáticos principales: 1) el de precipitaciones, que varía en sentido longitudinal, con valores > 2000 mm en el O que decrecen abruptamente hacia el E (< 200 mm); y 2) el de temperaturas, asociado con la altimetría: a mayores altitudes, menor temperatura. Finalmente, los imperantes vientos patagónicos con sentido O-E son característicos de la región, mostrando mayor intensidad durante la primavera y verano austral.

ACTIVIDAD VOLCÁNICA EN LOS ANDES DEL SUR: FUENTE CONTINUA DE GENERACIÓN DE CENIZA

A continuación se presentan las principales características de cuatro erupciones que tuvieron lugar en los Andes del Sur, y cuyos depósitos fueron subsecuentemente re-insertados en la atmósfera producto de la acción eólica.

La erupción del volcán Hudson en 1991

La erupción del volcán Hudson (45°54' S, 72°58' O) de 1991 consistió en dos pulsos: 1) actividad explosiva menor entre el 8 y 9 de agosto y con dispersión de tefra en dirección N-NE, y 2) fase eruptiva mayor entre el 12 y 15 del mismo mes, con un índice de explosividad volcánica (IEV) 5, y desarrollo de columnas eruptivas de entre 16 y 18 km de altura s.n.m. Las mismas se dispersaron hacia el Este (Fig.1), depositando ~ 4.3 km³ de tefra en territorio chileno y argentino (Scasso et al., 1994).

La erupción del volcán Chaitén en 2008-2010

La erupción riolítica del volcán Chaitén (42° 50' S, 72°39' O) del 1 de mayo de 2008 presentó una fase explosiva de 10 días de duración, IEV~4 y columnas eruptivas que alcanzaron los 18 km de altura. Luego

de 20 días signados por actividad híbrida (explosiva-extrusiva) el emplazamiento y destrucción de una serie de domos tuvo lugar hasta 2010. Alfano et al. (2011) estimaron que se generó 0.5-1 km³ de tefra, la cual mayormente fue depositada hacia el Este, tapizando una amplia región de la Patagonia argentina (Fig.1). El centro urbano más afectado fue la ciudad de Esquel.

La erupción de Cordón Caulle en 2011-2012

La erupción fisural del Cordón Caulle – parte del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (CVPCC; 40°35'S 72°5'O, Chile) – tuvo lugar el 4 de junio de 2011. De carácter riolítico, esta erupción presentó una fase inicial explosiva (IEV~ 4-5) de 10 días de duración con desarrollo de columnas eruptivas de hasta 12 km de altura. Luego de esta fase, actividad explosiva de menor intensidad y la emisión de un flujo de lava tuvieron lugar hasta agosto 2012, momento en el cual SERNAGEOMIN-OVDAS dio por concluida la erupción. En total, fueron emitidos más de 1 km³ de tefra, la cual también fue dispersada hacia territorio argentino (Pistolesi et al., 2015; Fig. 1). Los principales centros urbanos afectados fueron Bariloche, Villa La Angostura, y aquellos localizados en la estepa patagónica, especialmente Ingeniero Jacobacci.

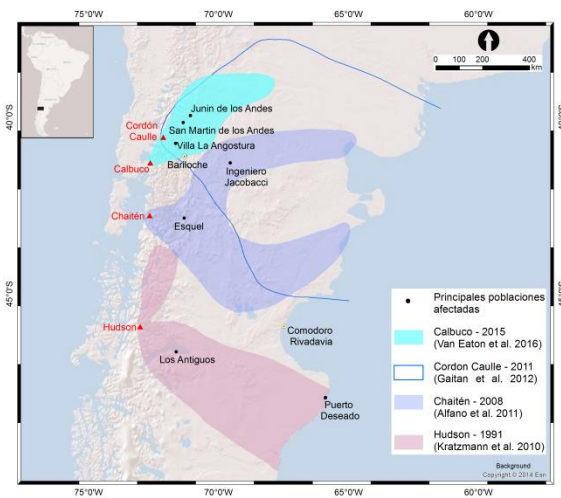


Fig. 1 Mapa de la zona de estudio y depósitos de las erupciones sujetas a resuspensión.

La erupción del volcán Calbuco en 2015

El 22 de abril de 2015 el volcán Calbuco (41°20'S, 72°37'O) inició un nuevo ciclo eruptivo. Luego de una fase explosiva con columnas eruptivas de hasta 15 km de altura e IEV 4, la actividad decreció, alternándose pequeñas explosiones y periodos de calma. La erupción culminó para fines de mayo de 2015, con un volumen total de tefra emitida <0.58 km³ (Van Eaton et al., 2016). A pesar que su ubicación (>100 km al S del CVPCC), debido a los

vientos dominantes al momento de la erupción, la zona afectada por la caída de tefra se localiza al N de los depósitos de Cordón Caulle de 2011-2012. Las principales ciudades afectadas fueron Junín y San Martín de los Andes.

TORMENTAS DE CENIZA VOLCÁNICA

Fenomenología

Inmediatamente después de su depositación, la ceniza de la erupción del Hudson comenzó a ser remobilizada por la acción eólica (Scasso et al., 1992). Wilson et al. (2011) visitaron la zona 16 años después de la erupción y mediante entrevistas y datos de campo realizaron valiosos aportes para la caracterización de este fenómeno. Testimonios recogidos durante su visita indican que la situación en relación a la ocurrencia de tormentas de ceniza fue extremadamente negativa durante los primeros 6 meses que siguieron a la erupción. Se estima que durante el resto de 1991 ocurrió, en promedio, una tormenta de ceniza cada 7 días. Entre septiembre 1991 y marzo 1992, el *Global Volcanism Program* (GVP) reportó una serie de tormentas de ceniza de gran magnitud que afectaron áreas ubicadas a más de 1500 km de la zona de remobilización. Sin embargo, de acuerdo con los testimonios, para 1996, 4 años después de la erupción, la frecuencia y magnitud de estos eventos habían disminuido considerablemente. No obstante, los autores identificaron que en zonas a 50-100 km del volcán donde se acumularon depósitos de tefra con espesores > 50 mm, la ceniza aún seguía siendo ocasionalmente remobilizada. En zonas costeras y de la estepa, donde la vegetación es escasa, hasta el día de hoy aún se reportan eventos (Fig. 2A).

Si bien hay reportes de resuspensión de ceniza luego de la erupción de Chaitén en 2008, no existen menciones sobre ocurrencia de tormentas de ceniza en forma periódica o a gran escala. No fue hasta la erupción de Cordón Caulle de 2011 que estos eventos cobraron relevancia nuevamente. De manera similar a lo ocurrido en Hudson, la remobilización de ceniza se produjo inmediatamente después de la erupción. Forte et al. (2017) estudiaron la fenomenología de estos eventos en la estepa patagónica, en una zona ~250 km al Este del volcán. La combinación de datos meteorológicos, reportes de periódicos y entrevistas a pobladores arrojaron resultados similares respecto a la cronología de los eventos asociados al Hudson. Los eventos de resuspensión fueron muy frecuentes e intensos durante los primeros 6 meses posteriores a la erupción. Algunos de estos desplazaron ceniza más de 1100 km, afectando a grandes ciudades como Buenos Aires. Al igual que para el caso de Hudson, los eventos presentan variación estacional, siendo

más frecuentes durante las estaciones secas y de fuertes vientos (entre septiembre y marzo). En términos absolutos, la frecuencia fue disminuyendo paulatinamente hasta abril de 2014, donde un evento de lluvias extraordinarias ocasionó la remobilización de gran cantidad del material volcánico remanente. Acompañando a estas variaciones se identificó también un cambio en el modo de ocurrencia de estos eventos: de tormentas masivas en donde la visibilidad se reducía prácticamente a cero (Fig. 2C) a torbellinos aislados que generan resuspensión local y de corta duración (Fig. 2B). De manera comparativa y utilizando la misma metodología que en la zona de estepa patagónica, se realizó un estudio en el área cordillerana (Parque Nacional Nahuel Huapi), más proximal al CVPCC. Los resultados muestran que esta zona también fue afectada por eventos de resuspensión luego de la erupción del 2011 (Fig. 2D).



Fig. 2A. Imagen MODIS (Aqua) adquirida el 24/01/10 donde se observa resuspensión de ceniza volcánica asociada a la erupción del volcán Hudson (1991) afectando la zona costera de la provincia de Santa Cruz B. Torbellino generando resuspensión de ceniza a escala local en la zona de Ingeniero Jacobacci. C. Tormenta de ceniza en Ingeniero Jacobacci (05/09/11). D. Tormenta de ceniza en la zona cordillerana, proximal al CVPCC (05/01/12)

Sin embargo, la frecuencia e intensidad de los eventos, así como su extensión en el tiempo, es menor. Esta diferenciación está intrínsecamente relacionada con el gradiente climático observado entre los Andes y la estepa patagónica. La alta tasa de precipitaciones y densa cobertura vegetal de la zona, facilitan la asimilación de las partículas más finas a los suelos. A esto debe sumarse la mayor granulometría del depósito primario de las zonas proximales respecto a la estepa patagónica. Los depósitos de la más reciente erupción de Calbuco (2015) también estuvieron sujetos a remobilización. Reckziegel et al. (2016) reportaron la frecuente resuspensión de los depósitos

inmediatamente después de su depositación, incluyendo eventos de gran escala que afectaron áreas localizadas a > 1000 km al N-NE de los depósitos. Sin embargo, al igual que para el caso de Chaitén, la frecuencia y magnitud de los mismos disminuyó rápidamente.

Caracterización física del material remobilizado

Debido a la naturaleza de los procesos de erosión eólica, la depositación y acumulación del material volcánico remobilizado no es espacialmente homogénea, variando principalmente en función del tamaño de las partículas y de la dinámica atmosférica. En observaciones de campo realizadas en zonas de la estepa patagónica afectadas por la erupción de Cordón Caulle, se identificaron 3 tipos de depósitos asociados al proceso de remobilización eólica: i) acumulaciones en forma lenticular alrededor de obstáculos (Fig. 3A); ii) acumulaciones alrededor y entre las raíces de plantas y arbustos (Fig. 3B); y iii) dunas errantes (Fig. 3C). Los mismos muestran distribuciones de tamaño de grano unimodales con un rango muy limitado de partícula (1 - 500 μm) y una mediana entre 20 y 120 μm (Fig. 3D).

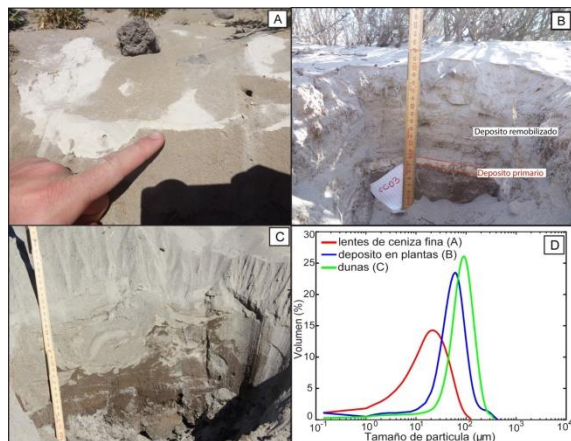


Fig. 3. Depósitos asociados a remobilización eólica de ceniza volcánica de Cordón Caulle. A. Lentes de ceniza fina. B. Depósito en las raíces de plantas y arbustos. C. Dunas errantes. D. Distribución de tamaño de partículas.

Wilson et al. (2011) también identificó depósitos asociados a remobilización eólica en la zona del Hudson. Tanto estos últimos como los descritos para el Cordón Caulle, presentan una muy buena selección de partículas y estructuras típicas tales como estratificación laminar y cruzada. Wilson et al. (2011) muestran que para 2008 la fracción más fina ($< 32 \mu\text{m}$) de los depósitos de caída primaria (1991) estudiados había desaparecido. Este hecho, combinado con la disminución de los espesores del depósito primario, indica un estado de erosión muy activo en los años posteriores a la erupción de Hudson. Para Cordón Caulle, la caracterización

física de los depósitos sugiere una acomodación de la fracción más fina del depósito de caída de ceniza primaria, la cual suele coincidir con la capa superior asociada con los últimos pulsos de la actividad volcánica. La fracción más fina no ha sido aún completamente remobilizada. Un análisis detallado y sistemático de los depósitos de remobilización de ceniza de Cordón Caulle y Calbuco en el futuro permitiría cuantificar mejor las tasas decrecientes de cada fracción granulométrica y comprender mejor la frecuencia de estos procesos erosivos.

Impactos

Al momento, la mayor cantidad de esfuerzos han estado focalizados en describir los impactos en comunidades rurales y actividades agrícolas-ganaderas. De acuerdo con Wilson et al. (2011), en la zona afectada por la erupción de Hudson estos últimos fueron extremos, en particular durante los primeros 3 meses después de la erupción. Los autores sugieren que las tormentas de ceniza exacerbaron el impacto de la caída primaria. Entre los impactos identificados, destacan: falta de alimento para el ganado, problemas gastrointestinales, ceguera por abrasión de córnea, contaminación de lana con ceniza, pérdida de ganado por falta de visibilidad en el campo y contaminación de fuentes superficiales de agua. La evaluación de impactos realizada por Forte et al. (2017) en comunidades rurales de la estepa patagónica afectadas por la resuspensión de los depósitos de Cordón Caulle permiten trazar igual conclusión: las tormentas de ceniza prolongan los efectos de la caída de ceniza primaria, siendo difícil discernir entre ambos mientras la erupción se encuentra en curso. En el caso de la erupción de Cordón Caulle, el impacto de la ceniza primaria y de las posteriores tormentas de ceniza amplificó las consecuencias de un periodo de sequía que azotaba la zona desde 2007.

Las tormentas de ceniza han afectado numerosos núcleos urbanos patagónicos, desde la cordillera hasta la costa. La zona costera más afectada fue aquella al sur del paralelo 45°S , producto de la resuspensión de los depósitos de Hudson (Wilson et al., 2011; Fig. 2A). Reckziegel et al. (2016) reportaron que la resuspensión de los depósitos de Calbuco causaron cierre de rutas terrestres y cancelación de vuelos. Similares impactos en infraestructura y vías de comunicación fueron reportados para los casos de Hudson y Cordón Caulle.

Nuestro conocimiento entorno al impacto de las tormentas de ceniza en la salud humana es aún más escaso. En entrevistas realizadas a productores rurales por Forte et al. (2017), estos reconocieron haber sufrido un impacto emocional extremo debido

a la prolongación por años de las consecuencias, donde incluso más de la mitad consideró abandonar sus actividades agropecuarias. Debido al proceso físico que permite la separación del material resuspendido del depósito de caída primaria, el mismo presenta menor granulometría, incrementando el riesgo de afectación de las vías respiratorias. Mediciones de concentración de material particulado en aire ($PM \leq 10$) realizados por Elissondo et al. (2016) durante los 10 meses posteriores a la erupción de Cordón Caulle evidencian como la calidad de aire se vio afectada por las tormentas de ceniza. Los valores límites de exposición diaria recomendados fueron superados tanto en localidades próximas al volcán (Villa La Angostura) como en la estepa (Ingeniero Jacobacci). Altos valores de material particulado en aire fueron también reportados en relación a la resuspensión de los depósitos de Calbuco (Reckziegel et al., 2016). Desafortunadamente, a la fecha no existen estudios epidemiológicos en las áreas afectadas por estos fenómenos.

CONSIDERACIONES FINALES

Las tormentas de ceniza son un fenómeno que afecta de manera recurrente a gran parte de la Patagonia, y como se ha demostrado, pueden exacerbar y prolongar en el tiempo los efectos e impactos de la caída de ceniza primaria.

Si bien los trabajos realizados hasta la actualidad han permitido describir el fenómeno de manera cualitativa y caracterizar los principales factores influyentes en su ocurrencia, existen aún un gran número de interrogantes a responder: ¿Cuáles son las contribuciones específicas de las precipitaciones, el viento, la variabilidad estacional, el volumen y la distribución espacial de material volcánico en la ocurrencia de estos eventos? ¿Por cuánto tiempo se prolongarán las tormentas de ceniza en una determinada área luego de una erupción? La falta de registros meteorológicos continuos es uno de los principales limitantes para dar respuesta a estas preguntas. Parametrizar las variables físicas que controlan estas tormentas de ceniza es esencial no solo para el entendimiento del fenómeno sino también para su modelado y pronóstico. De misma forma, la falta de estaciones permanentes de monitoreo de calidad de aire, sumado a la ausencia de un registro sistemático de los impactos que este fenómeno ocasiona, impiden la evaluación del riesgo que implican para la salud humana.

La actividad del frente volcánico andino, sumado a las condiciones meteorológicas-ambientales de la región, permite aventurar a predecir que las tormentas de ceniza seguirán ocurriendo en el futuro. Por este motivo es necesario incrementar los esfuerzos en su estudio y caracterización, así como

también en las medidas de mitigación pertinentes. Consecuentemente, resulta de primordial importancia integrar este peligro volcánico (secundario) en los esquemas de reducción de riesgo de desastre asociados a la actividad volcánica.

Agradecimientos

P.F. y J.M.C recibieron apoyo de *Marie Curie Initial Training Network 'VERTIGO'*, financiada a través del programa *European Seventh Framework Programme* (FP7 2007–2013) bajo el subsidio n° 607905. L.D. y C.B. recibieron apoyo de la Fundación Nacional Suiza para la Ciencia mediante el subsidio # 200021_163152.

Referencias

- Alfano, F., Bonadonna, C., Volentik, A. C., Connor, C. B., Watt, S. F., Pyle, D. M., & Connor, L. J. (2011). Tephra stratigraphy and eruptive volume of the May, 2008, Chaitén eruption, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 73(5), 613-630.
- Elissondo, M., Baumann, V., Bonadonna, C., Pistolesi, M., Cioni, R., Bertagnini, A. & Gonzalez, R. (2016). Chronology and impact of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 675-704.
- Forste, P., Domínguez, L., Bonadonna, C., Gregg, C. E., Bran, D., Bird, D., & Castro, J. M. (2017). Ash resuspension related to the 2011–2012 Cordón Caulle eruption, Chile, in a rural community of Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Pistolesi, M., Cioni, R., Bonadonna, C., Elissondo, M., Baumann, V., Bertagnini, A., & Francalanci, L. (2015). Complex dynamics of small-moderate volcanic events: the example of the 2011 rhyolitic Cordón Caulle eruption, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 77(1), 1-24.
- Reckziegel, F., Bustos, E., Mingari, L., Báez, W., Villarosa, G., Folch, A., & Osoreo, S. (2016). Forecasting volcanic ash dispersal and coeval resuspension during the April–May 2015 Calbuco eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 321, 44-57.
- Scasso, R. A., Corbella, H., & Tiberi, P. (1994). Sedimentological analysis of the tephra from the 12–15 August 1991 eruption of Hudson volcano. *Bulletin of Volcanology*, 56(2), 121-132.
- Van Eaton, A. R., Amigo, Á., Bertin, D., Mastin, L. G., Giacosa, R. E., González, J., & Behnke, S. A. (2016). Volcanic lightning and plume behavior reveal evolving hazards during the April 2015 eruption of Calbuco volcano, Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3563-3571.
- Wilson, T. M., Cole, J. W., Stewart, C., Cronin, S. J., & Johnston, D. M. (2011). Ash storms: impacts of wind-remobilised volcanic ash on rural communities and agriculture following the 1991 Hudson eruption, southern Patagonia, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 73(3), 223-239.