

La erupción del volcán Calbuco en 2015: Volcanología, sociedad y ecosistemas

Jorge E. Romero¹, Mauricio Mella², Frederick Swanson³, Charlie Crisafulli⁴, Julia Jones⁵, Mauro E. González⁶, Antonio Lara⁶, Daniele Morgavi⁷, Fabio Arzilli⁸, Jorge Clavero⁹, Florencia Reckziegel¹⁰.

Contacto: jorge.romerom@alumnos.uda.cl

Introducción

En la última década, han ocurrido varias erupciones con magnitud moderada a grande en la Zona Volcánica Sur de los Andes, las que han tenido, incluso, efectos a escala continental (por ejemplo Chaitén en 2008-2009, Cordon Caulle en 2011-2012 y Calbuco en 2015), afectando fuertemente a la sociedad, los ecosistemas y los recursos a pocos kilómetros de la fuente, y de menor manera a mayores distancias. Este patrón de recurrentes erupciones demuestra la importancia de esta región como un laboratorio natural a nivel global para el estudio de procesos volcánicos, los disturbios que éstos crean y la forma en que el ecosistema responde a estos repentinos eventos naturales. Anteriormente se han conformado equipos multidisciplinarios y multinacionales de respuesta temprana para documentar los tipos, intensidad y distribución de los materiales emitidos por los volcanes y las respuestas del entorno a estos elementos. Una característica importante de las regiones afectadas es la presencia de parques y extensas reservas naturales, tanto públicas como privadas, las cuales proveen una oportunidad para analizar los depósitos dejados por las erupciones e investigar en el largo plazo el efecto de los disturbios y recuperación de los ecosistemas. La erupción del 22-23 de abril de 2015 del Volcán Calbuco tuvo impactos en las actividades sociales y ecosistemas en el sur de Chile y en Argentina, debido a la espesa caída de piroclastos, corrientes calientes de gases y rocas, además de flujos de lodo volcánico. Lejos de ser una erupción "simple", este evento mostró una historia de complejos fenómenos que ocurrieron simultáneamente en pocas horas. Las primeras investigaciones de campo revelaron nuevos depósitos volcánicos ampliamente distribuidos, los que afectaron variados asentamientos humanos alrededor del volcán, y crearon patrones interesantes de respuestas ecosistémicas. Estas respuestas tuvieron intensidad variable a través de la geografía, especialmente en quebradas a causa

de los distintos procesos volcánicos. Esta erupción reciente planteó la oportunidad de realizar investigaciones científicas tempranas, además de colaboración con la comunidad, autoridades y administradores de los parques, sentando las bases para estudios de largo plazo.

Volcanismo, sociedad y ecosistemas

La Tierra primitiva estuvo repleta de volcanes activos, que probablemente incidieron de manera fundamental en la construcción de nuestra preciada atmósfera, y las ya conocidas consecuencias para el inicio de la vida. Actualmente, muchos de los volcanes activos se restringen a zonas bien definidas asociadas a procesos tectónicos activos en el Cinturón de Fuego del Pacífico. En dicho contexto, la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana interactúan en un proceso de convergencia, dando lugar a la *subducción* (Figura 1), la cual consiste en el hundimiento de la primera placa bajo la segunda. El calor que genera dicho proceso es responsable de la fusión parcial de las rocas de la astenósfera formando magma. Mientras la convergencia de las placas deforma la litósfera (sección rígida de la Tierra) y su corteza, forzando el levantamiento de los Andes, el magma que viene desde el manto terrestre abastece al arco volcánico activo (Figura 1).

Una amplia gama de manifestaciones caracteriza a las erupciones volcánicas, pero en general éstas pueden dividirse en efusivas (emisiones pasivas de lava) o explosivas, a causa de la fragmentación violenta del magma en materiales incandescentes (*piroclastos*). Las erupciones explosivas pueden formar emisiones verticales de gas y piroclastos (*columnas eruptivas*), que en ocasiones colapsan sobre los flancos del volcán como corrientes calientes de piroclastos y gases (*corrientes de densidad piroclástica, CDPs*) (Figura 1). La ceniza volcánica (*tefra*) constituye el peligro de mayor propagación en la atmósfera. Estos materiales amenazan a la aviación pues el ingreso de la ceniza en las turbinas de los aviones puede causar fallas mecánicas. Además, el choque de estas partículas electrifica las nubes de piroclastos, resultando en tormentas eléctricas. Estas últimas manifestaciones son menos peligrosas en comparación con la erupción por sí sola, y pueden entregar información sobre la intensidad de la misma. Una vez que la ceniza está flotando en la atmósfera, se transporta a través del viento y luego se deposita en el suelo por gravedad. Generalmente el tamaño de las partículas y el espesor de estos mantos de tefra decrece lejos del volcán y el material más fino puede viajar a decenas o cientos de kilómetros. Por otro lado, los aluviones hiperconcentrados de escombros o

¹ Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.

² Oficina técnica de Puerto Varas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Puerto Varas, Chile.

³ Pacific Northwest Research Station, U. S. Forest Service, Corvallis, USA.

⁴ Pacific Northwest Research Station, U. S. Forest Service, Washington, USA.

⁵ College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, USA.

⁶ Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Center for Climate and Resilience Research (CR)2, Chile.

⁷ Department of Physics and Geology, University of Perugia, Perugia, Italy

⁸ School of Earth, Atmospheric and Environmental Sciences, University of Manchester, Manchester, United Kingdom.

⁹ Escuela de Geología, Universidad Mayor y Amawta Consultores, Santiago, Chile.

¹⁰ Universidad Nacional de Salta, Argentina

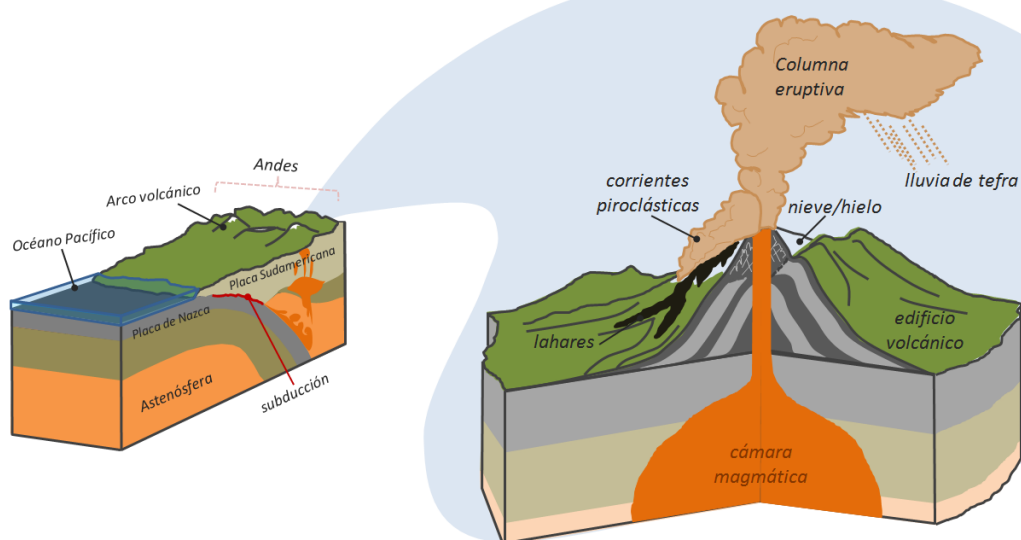


Figura 1: Esquema ilustrado de un margen de subducción activo. En detalle se describe la estructura típica de un volcán y de los procesos que ocurren durante una erupción como la del Calbuco en 2015.

flujos de lodo volcánico (*lahares*) se desencadenan en condiciones de abundante agua, donde los materiales volcánicos calientes (rocas y/o gases) funden el hielo y nieve, todo lo cual desciende por los canales, ríos e incluso los flancos de los volcanes, incorporando rocas, suelo, vegetación y animales a su paso. Estos aluviones son peligrosos tanto por su velocidad como por su alta capacidad para transportar fragmentos de gran tamaño (incluso casas), y pueden causar daños en el ecosistema e infraestructura humana, como caminos, puentes y casas.

Las erupciones afectan los sistemas ecológicos naturales como también los recursos y el clima en variados aspectos, produciendo interrupciones o *disturbios*. La *ecología volcánica* es una rama del campo de la *ecología de disturbios*, que ha cobrado gran importancia en las últimas décadas, estudiando procesos como incendios forestales, daños generados por insectos, deslizamientos, viento y tormentas de nieve sobre plantas y comunidades animales. Las erupciones poseen varios mecanismos de interrupción, incluyendo entierro, abrasión, carbonización, combustión, fuerza de impacto y toxicidad química. Los efectos de esos disturbios en los sistemas ecológicos son variables, desde menores y pasajeros hasta profundos y duraderos, incluso permanentes, pero rara vez causan la aniquilación total de la *biota* (comunidad o poblaciones de organismos). En el mejor de los casos, las erupciones producen cambios en las poblaciones animales y vegetales, como también en sus recursos (nutrientes, comida, refugio, agua). El grado del cambio está mayormente influenciado por la intensidad del disturbio volcánico (por ejemplo espesor de tefra), por condiciones presentes durante la erupción e incluso por el momento en el que ésta ocurre, y también por los rasgos de vida (autoecología) de las especies que allí habitan. Los organismos (tanto vivos o muertos), denominados *legados biológicos*, que permanecen en el sitio perturbado después de la erupción, son la variable más importante que influye en la tasa y el patrón de respuesta del ecosistema a corto y largo plazo.

Trabajando en áreas protegidas (públicas y privadas), un reto adicional

El acceso a los volcanes y su entorno es crítico para estudiar procesos volcánicos y ecológicos. Lo ideal es que las decisiones de gestión nazcan de los propietarios o administradores del sitio, identificando a la investigación científica como un objetivo primordial para el paisaje post-eruptivo. Las oportunidades investigativas pueden verse facilitadas cuando hay áreas protegidas (públicas o privadas), ya que la investigación puede constituir un objetivo de gestión, protegiendo así la infraestructura de trabajo de los científicos. En los Andes, como en muchas otras partes del mundo, numerosos volcanes están en parques remotos, donde los caminos y accesos son limitados o ausentes. Es importante que los administradores de esos parques comprendan el significado global del ingreso de los científicos para el estudio volcanológico y de ecología volcánica. En el caso del volcán Calbuco, existen tanto parques públicos como privados (Reserva Nacional Llanquihue administrada por CONAF, y los parques privados Valle Los Ulmos y Los Volcanes; Figura 2).

La erupción del volcán Calbuco en 2015

El violento despertar del volcán Calbuco el 22 de abril de 2015 provee una oportunidad excelente para la colaboración de geólogos, ecólogos y administradores de áreas protegidas. Este evento ocurrió 54 años después de la última gran erupción del volcán en 1961, tras solo unas pocas horas de incremento sísmico perceptible (sismos imperceptibles fueron registrados desde 3 meses antes por la red de Sernageomin). El material piroclástico dispersado por los vientos sobre el sur de Chile y Argentina produjo colapso de techumbres y cancelación de vuelos comerciales. De forma simultánea, los colapsos parciales repetitivos de la columna eruptiva formaron CDPs que fluyeron por las laderas del volcán, rellenando las quebradas y valles con rocas incandescentes y ceniza. Las CDPs y las rocas

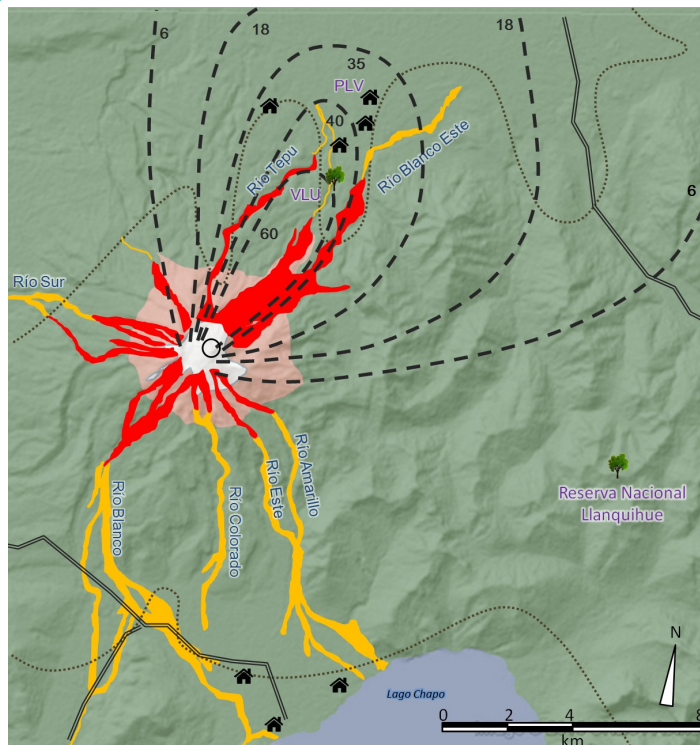


Figura 2: Distribución de los depósitos de la erupción del volcán Calbuco en 2015. En rojo se muestran los depósitos de corrientes de densidad piroclástica, en amarillo los lahares y las curvas segmentadas son los espesores de tefra (cms). Se señalan como PLV y VLU las áreas del Parque Los Volcanes y Valle de los Ulmos.

balísticas (bombas) que cayeron cerca del cráter fundieron la nieve y el pequeño glaciar remanente ubicado en la cima del volcán, desencadenando una serie de lahares compuestos de una mezcla de rocas (algunas de varios metros), suelo, vegetación y agua, que fluyeron aguas abajo por varios cauces, destruyendo la mayor parte de la vida a su paso, así como infraestructura (casas, puentes, obras civiles, etc.). Los costos sociales de esta erupción significaron el desplazamiento temporal de 6.685 personas, mientras que la reconstrucción se estima en ~5.9 millones de dólares (~3.76 billones de pesos chilenos).

Observaciones tempranas de los depósitos y las respuestas ecológicas y sociales

Desarrollo eruptivo

Los días 22 y 23 de abril de 2015 ocurrieron dos fases eruptivas sucesivas. La primera fue relativamente breve (1.5 horas), con una columna eruptiva estratosférica que desarrolló un notable penacho (Figura 3) de hasta 17 km de altura. Luego de 5.5 horas de pausa, la segunda fase

comenzó con una erupción aún más intensa que duró 6 horas (Figura 3). Se infiere que las CDPs más extensas se desarrollaron durante esta segunda fase eruptiva, acompañándose por un cambio en el color y densidad de los fragmentos juveniles en los depósitos (de gris claro a oscuro), y un incremento de la actividad eléctrica (Figura 3). En comparación, una tercera fase comenzada pocos días después, el 30 de abril, solo desarrolló una columna pequeña (<4.5 km) y fue relativamente pobre en ceniza (Figura 3).

Depósitos de la erupción

La erupción del 22-23 de abril de 2015 depositó 0.27 -0.56 km³ de tefra sobre el sur de Chile y la Patagonia Argentina, equivalentes a casi 150 veces el volumen del Estadio Maracanã de Brasil. Esto representa un tercio a un medio del volumen emitido por las última erupciones del volcán Chaitén (2008) o del Cordón Caulle (2011). En el poblado de Ensenada (15 km al noreste del cráter) el depósito de tefra alcanzó 15 a 30 cm de espesor y produjo el colapso de techumbres (Figura 4A), mientras que en la parte alta del flanco noreste del volcán el depósito alcanzó casi 60 cm de espesor, entre otras disrupciones. La tefra se compone, en la mayoría de los casos, de cuatro capas de material piroclástico de composición andesítica (roca volcánica común en los Andes) diferenciables por su color y densidad (Figura 4B). Las CDPs de los ríos Tepú y Blanco Este-Frío tienen un espesor total de hasta 8 metros, y se formaron por, al menos, 6 flujos, con espesores individuales entre 1 y 4 metros, que probablemente

ocurrieron al final de la primera fase y durante el transcurso de la segunda, transportando piroclastos de hasta 1 m de diámetro, muchos con forma de coliflor. Estas corrientes fluyeron principalmente por los valles y depositaron material suficiente para rellenar hasta el tope 290 coliseos romanos (Figura 4C). Los lahares o flujos hiperconcentrados volcánicos, estuvieron compuestos por fragmentos volcánicos, escombros y agua, afectaron los valles de los ríos Blanco y Pescado, sepultando casi 300 casas (Figura 4D).

Impactos y respuestas sociales

Las casas e infraestructura crítica expuestas a alto peligro por lahares y corrientes piroclásticas, definidas en los mapas previamente levantados, fueron las más impactadas. Los mapas generados 15 años antes, demostraron su validez y relevancia. Los reportes indican que 6.685 personas y 3.221 animales fueron evacuados, cuatro puentes colapsaron, 463 casas fueron parcial o totalmente destruidas y pérdidas del orden de los 10 millones de dólares en la industria salmonera (Río Pescado en el flanco Norte y río Blanco en el Sur) y por la destrucción de una central hidroeléctrica. El sistema cerrado de agua para la crianza de salmones atlánticos en cautiverio en el río Blanco fue completamente



Figura 3: Desarrollo de la erupción del volcán Calbuco en 2015.

destruido y sepultado con escombros y rocas de tan grandes como un vehículo; 4527 hectáreas de bosque y pastizales fueron afectados. El turismo se vio perjudicado luego del cierre duradero de la Reserva Nacional Llanquihue, y también disminuyeron los visitantes a Ensenada y Puerto Montt. El gobierno chileno debió desembolsar entre 8.5 y 10 millones de dólares durante la emergencia. No ocurrieron muertes, debido a la respuesta natural de los habitantes, basada en información difundida por el Servicio Geológico y Minero chileno (Sernageomin) durante años en la zona.

Disturbios y respuesta de la vegetación

La ladera norte del volcán Calbuco se cubrió por 40-50 cm de escorias gruesas, afectando vastas extensiones de praderas y bosque nativo (Figura 5A). Uno de los principales efectos de la caída de tefra sobre la vegetación fue la defoliación completa y quiebre de ramas y ramillas de árboles y arbustos, y el sepultamiento de otras formas de vida como helechos, musgos y hierbas del piso del bosque. De la misma forma, la regeneración arbórea del bosque fue fuertemente afectada por el proceso de abrasión o sepultamiento. Además, otros procesos del ecosistema fueron igualmente alterados como la escorrenría superficial,

infiltración y percolación de agua, aireación del suelo y actividad biológica y reciclaje de nutrientes, entre otros.

Las corrientes de densidad piroclástica (como las del río Tepú) se movieron rápidamente por los principales cauces, creando una franja de disturbios en los bancos y orillas del río, y en los bosques ribereños (Figura 5B). Esto produjo la abrasión y el enterramiento de praderas, carbonizando los fustes de los árboles y despojándolos de sus las ramas y hojas (Figura 5B). En la ladera norte, entre los 650- 1100 m snm, los bosques siempreverdes Valdivianos, no tuvieron mejor suerte. La caída de tefra despojó la mayoría de las ramas y hojas de Canelos, Coigües y Notros en zonas altas, resultando en una alta mortalidad de árboles (Figura 5C). Bajo este bosque de altura, los efectos de la caída de tefra fueron tal vez menos severos, con el desprendimiento de pequeñas ramas, gran abrasión en los troncos, pero completa defoliación. Sin embargo, los árboles (Trevo, Tapa y Patagua valdiviana) han comenzado a brotar activamente generando un nuevo follaje (Figura 5C). Las epifitas fueron desprendidas de los troncos y fueron amontonadas sobre la superficie. Estas comúnmente contenían suelo y crearon genuinas "islas de fertilidad" en la superficie estéril de la tefra. De hecho, algunas plántulas ya estaban creciendo sobre esos montículos (Figura 5D).

De un total de 40 tarugos de árboles, los resultados preliminares indican que algunos de ellos son muy antiguos (p. ej. Tapa, con edades de entre 270 y 320 años, o Trevo,

con 188 años), mientras que otros como el Coihue parecen haber crecido justo después de la erupción de 1961 (edades entre 50 y 56 años), pero comparten territorio con Ulmos que sobrevivieron a dicha erupción (61 a 91 años de edad). Esto implica que las erupciones no siempre afectan al bosque de la misma forma, ni a las mismas especies.

Las observaciones ecológicas se basan en una pequeña base de trabajo que esclarece las respuestas iniciales de la vegetación forestal a la caída del tefra. Debido a que las características de ésta (gruesa y densa) difieren de la mayoría de tefras estudiadas con anterioridad, su estudio puede proporcionar nuevas ideas sobre cómo los distintos tipos y textura de la tefra pueden influir la respuesta ecológica de los bosques en el corto y largo plazo bosques. Esta información se aplica tanto a las ciencia básicas en términos de la comprensión de las respuestas de los ecosistemas a la caída de tefra, como también al valor asociado a las prácticas de restauración.

Perspectivas futuras para la investigación científica

A pesar del trabajo prometedor inicialmente desarrollado en

condiciones en el reservorio de magma y en el conducto del volcán desencadenaron la erupción y produjeron el ascenso rápido del magma. El trabajo futuro que combine análisis texturales, petrología y geoquímica de los materiales emitidos puede ayudar a revelar las causas de esta erupción. Sin embargo, un monitoreo más exhaustivo y con mayor conocimiento de los patrones “normales” del volcán es absolutamente necesario para estar mejor preparados. La población permanente y flotante debe acceder a la información sobre la actividad volcánica de manera oportuna y adecuada. Debe promoverse la educación sobre los fenómenos volcánicos, sus consecuencias y la respuesta adecuada ante ellas, ya desde los niveles educativos básicos. Los planes reguladores de ordenamiento territorial deben ser actualizados y mejorados con el fin de mejorar la respuesta de las comunidades y, en particular, para disminuir la vulnerabilidad de infraestructura esencial frente a los peligros volcánicos.

Desde la perspectiva del monitoreo de la dispersión de las nubes de ceniza y su pronóstico, el volcán Calbuco ha permitido enriquecer las bases de datos. Las erupciones de los días 22 y 23 de abril ocurrieron con buen tiempo, permitiendo la detección y seguimiento satelital del evento.

Además, existió una extraordinaria cantidad de descargas eléctricas en las plumas de ceniza, como también mediciones detalladas en tierra por geólogos e investigadores atmosféricos en Chile y Argentina.

En conjunto, existe una excelente oportunidad para ajustar los pronósticos de modelos de dispersión de cenizas en la atmósfera usando datos de validación de esta erupción.

Los estudios futuros buscarán determinar las características físicas de los lahares y la

colaboración multidisciplinar con la comunidad y las agencias de emergencia permitirán mejorar los planes de respuesta en las zonas de peligro. Adicionalmente, es necesario definir y entender las condiciones que permitieron el desarrollo de corrientes piroclásticas en los flancos norte y oeste del volcán en los últimos 2600 años.

Los planes para estudiar las respuestas ecológicas en el futuro cercano incluyen continuar el monitoreo de las



Figura 4: Impactos y depósitos de la erupción. **A:** Colapso de techumbres por el peso de la caída de tefra. **B:** Depósito de caída de tefra, con sus distintivas capas y un detalle al microscopio de los piroclastos que las componen. **C:** Corriente piroclástica en el río Tepú, con casi 6 metros de espesor (escala = 1m), compuesto por cenizas y bombas en forma de coliflor. **D:** Efectos de un lahar en el río Blanco Correntoso.

esta erupción, varias preguntas importantes persisten. ¿Por qué la erupción comenzó con tan pocos precursores perceptibles? La mayoría de los sistemas de alerta temprana alrededor del mundo asumen que los volcanes de larga calma están acompañados por movimientos reconocibles de magma. Pero esta erupción parece ser una excepción notable, con incrementos graduales solo en los meses anteriores. ¿Existieron sutiles patrones sísmicos que puedan detectarse para las próximas erupciones? Incluso, ¿Qué

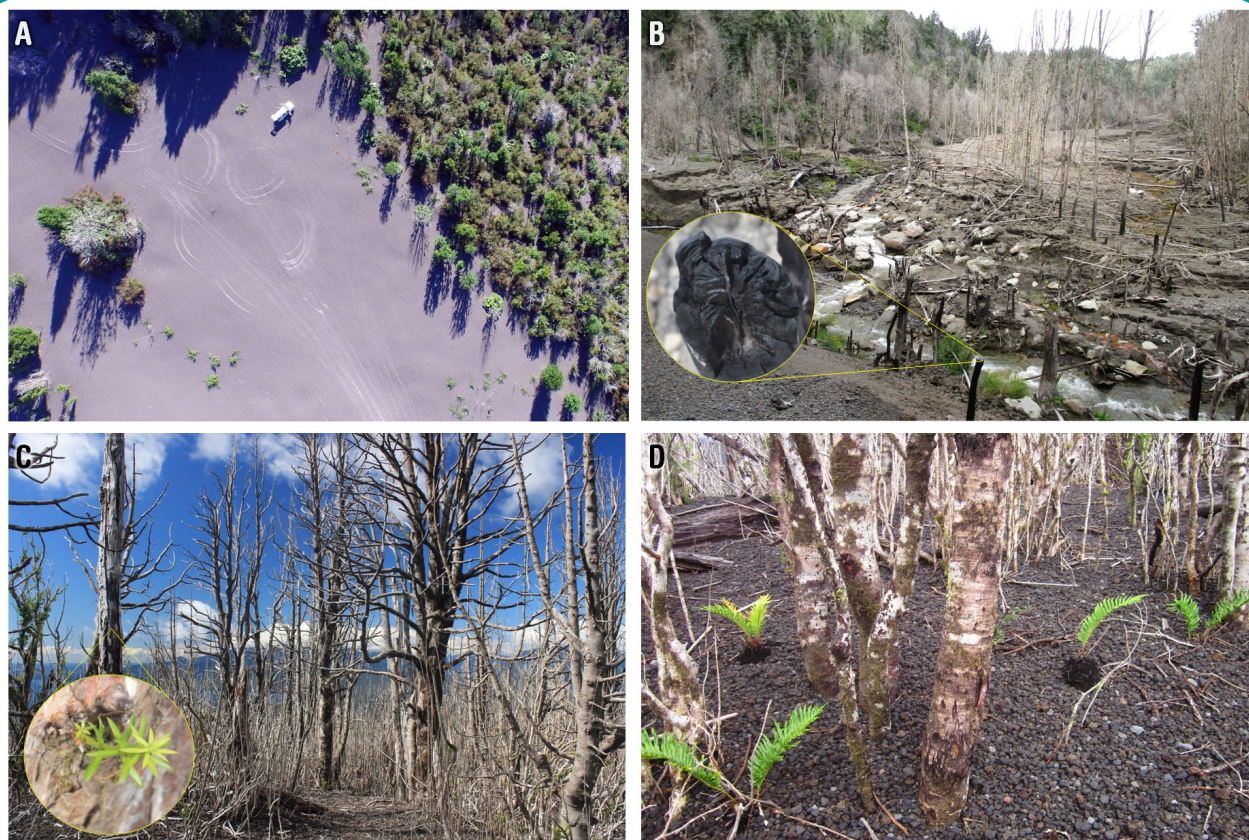


Figura 5: Disturbios ecológicos causados por la erupción. **A:** Praderas cubiertas por tefra vistas desde un dron en el Valle de los Ulmos. **B:** Bosques riveraños afectados por corrientes piroclásticas en el río Tepú, incluyendo carbonización de algunos troncos. **C:** Mortalidad de árboles en las laderas altas del volcán, y nuevos brotes de follaje. **D:** "Islas de fertilidad" a partir de epifitas.

comunidades de bosques, artrópodos terrestres, poblaciones de aves y mamíferos, tal cual ellas responden a la caída de tefra. Además, se monitorearán las propiedades físicas y químicas de la tefra y de la temperatura y humedad relativa del aire a lo largo de esos depósitos. El volcán Calbuco puede ser utilizado como un laboratorio vivo y una sala de clases para el entrenamiento de la comunidad, estudiantes de las más diversas disciplinas. El trabajo interdisciplinario y la colaboración interinstitucional de distintos centros de investigación, con el apoyo de los dueños/ administradores de parques privados es una oportunidad excepcional para llevar a cabo estudios de largo plazo. Las publicaciones científicas (en preparación) y la disseminación de sus resultados a la comunidad fomentarán sin duda el trabajo de nuevos investigadores en la ciencia de la geología y ecología volcánica del Calbuco.

Agradecimientos

El financiamiento fue otorgado por los proyectos CONICYT/FONDAP/15110009, Fondecyt 1130410 y un fondo urgente de NERC Science for the Environment (UK). A la Dra. Alexa Van Eaton (USGS) por sus valiosos comentarios. A Andrea Leiva por la preparación de los datos en SIG y la asistencia en terreno y a M. Rojas por procesar los tarugos de árboles. Se agradece a los propietarios de los parques Los Ulmos (Pablo Saumann y Bárbara Corrales) y Valle Los Volcanes (Alex Ziller) por las facilidades para acceder a las zonas afectadas por la erupción. Las fotografías

de Carolina Barria, Eduardo Minte, Claudio Gallegos, Christian Valenzuela y Guillermo Villegas han ayudado a ilustrar este artículo.

Lecturas sugeridas

CASTRUCCIO, A., *et al.*, 2016, Eruptive parameters and dynamics of the April 2015 sub-Plinian eruptions of Calbuco volcano (southern Chile). *Bulletin of Volcanology*, 78(9), 62.

CRISAFULLI C. *et al.*, 2015, Volcano ecology: Disturbance characteristics and assembly of biological communities. In: Sigurdsson, H., editor. *The Encyclopedia of Volcanoes. 2nd edition*. Amsterdam: Academic Press. p. 1265-1284.

MELLA, M. *et al.*, 2015, Productos volcánicos, impactos y respuesta a la emergencia del ciclo eruptivo abril-mayo (2015) del volcán Calbuco. *XIV Congreso Geológico Chileno*. La Serena, Chile.

MORENO, H., 1999, Mapa de Peligros del volcán Calbuco, Región de los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería. Documentos de Trabajo No.12, escala 1:75.000. <http://www.sernageomin.cl/pdf/mvv/CALBUCO.pdf>.

ROMERO J. E. *et al.*, 2016, Eruption dynamics of the 22-23 April 2015 Calbuco Volcano (Southern Chile): Analysis of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 317, 15-29.

VAN EATON, A.R. *et al.*, 2016, Volcanic lightning and plume behavior reveal evolving hazards during the April 2015 eruption of Calbuco volcano, Chile. *Geophysical Research Letters*, 43.