



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Análisis del riesgo volcánico por caídas piroclásticas y peligros asociados para los sistemas de transporte naval de Patagonia Andina

Tesis presentada para optar por el título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires
en el área de Ciencias Geológicas

Lic. Pablo Agustín Salgado

Director de Tesis - Dr. Gustavo Villarosa
Codirector de Tesis - Dr. Thomas M. Wilson
Consejera de Estudios - Dra. Vanesa D. Litvak

Lugar de trabajo - IPATEC, Instituto Andino-Patagónico de Tecnologías Biológicas y
Geoambientales (CONICET-UNCO) Av. de los Pioneros 2350, 8400 S. C. de Bariloche,
Río Negro, Argentina

Buenos Aires, 2024

Análisis del riesgo volcánico por caídas piroclásticas y peligros asociados para los sistemas de transporte naval de Patagonia Andina

Resumen

La Patagonia argentina es un territorio recurrentemente afectado por caídas de materiales piroclásticos, los cuales se generan a partir de erupciones explosivas de los volcanes andinos y se dispersan hacia el este por acción del flujo regional de vientos extra tropicales del oeste. En décadas recientes, cuatro eventos muy significativos de caídas piroclásticas impactaron el territorio nacional, producto de las erupciones de los volcanes Hudson (1991), Chaitén (2008), Cordón Caulle (2011-2012) y Calbuco (2015). En todos estos casos se ha observado que, por un lado, los recursos navales resultaron ser vitales para el manejo de las distintas situaciones de emergencia, lo que también se replica para otras situaciones de desastre de origen no-volcánico que afectaron la región. Pero, paradójicamente, los sistemas de transporte naval también resultaron ser particularmente vulnerables a los efectos de las caídas piroclásticas y otros tipos de peligros volcánicos asociados. En Patagonia, estos antecedentes se remontan a más de un siglo en el pasado e incluyen instancias tan extremas como el hundimiento de embarcaciones, la desaparición de puertos y la pérdida asociada de vidas humanas. Incluso se ha observado que los impactos provocados por estos eventos perduraron por décadas después de finalizadas las erupciones volcánicas y que se extendieron más allá de las zonas inicialmente afectadas por las caídas piroclásticas primarias.

A pesar de estos antecedentes, el conocimiento acerca del riesgo que representan las erupciones volcánicas explosivas para el transporte naval es extremadamente limitado, en contraposición a lo que se conoce para otros modos de transporte como la aviación. El objetivo principal de esta tesis doctoral consiste en abordar esta falta de conocimientos que, sorprendentemente, se replica a escala global, evaluando las múltiples interrelaciones que existen entre el fenómeno volcánico y los emblemáticos sistemas de transporte naval de la Patagonia argentina. Esto se ha logrado mediante la reconstrucción y el análisis multimetodológico de numerosos casos de estudio, que primordialmente incluyen cuatro erupciones volcánicas explosivas recientes y otras situaciones de emergencia derivadas de otros tipos de peligros geo-meteorológicos.

En primera instancia, se propuso evaluar la capacidad de los recursos de transporte naval de la Patagonia andina para dar respuesta a situaciones de desastre (**Capítulo 2**). A partir de visitas de reconocimiento a sitios afectados; reuniones y entrevistas de investigación semi-estructuradas y dirigidas con 52 partes afectadas, pertenecientes a 24 entidades u organizaciones diferentes; y la consulta de fuentes de información complementaria, se reconstruyó un total de 19 casos de estudio referidos a acciones de respuesta naval a emergencias, asociadas a 5 eventos distintos (**Anexo A**).

Los casos de estudio fueron luego sistematizados y cotejados según un nuevo modelo para la tipificación de acciones de respuesta naval a la emergencia, sustentado en ocho funciones básicas del manejo de emergencias. El análisis sistemático de casos permitió identificar una serie de problemáticas recurrentes que limitan la posibilidad de gestionar este tipo de situaciones por medios náuticos, las cuales se han agrupado en cinco aspectos principales: (1) aspectos asociados a los peligros; (2) aspectos asociados a las accesibilidades territoriales; (3) aspectos intra e interorganizacionales; (4) aspectos demográficos; y (5) aspectos de vulnerabilidad de los sistemas de transporte naval a los efectos de las caídas piroclásticas y otros peligros asociados. A partir de ello, se ha podido enumerar una serie de recomendaciones replicables, basadas en los principios fundamentales de la gestión de desastres, que permiten abordar la planificación de futuras eventualidades por medios navales.

En segunda instancia, se propuso evaluar los múltiples efectos negativos, o impactos, de las caídas piroclásticas sobre cada uno de los elementos que componen una red de transporte naval (**Capítulo 3**). A partir de visitas de reconocimiento a sitios afectados; reuniones y entrevistas de investigación semi-estructuradas y dirigidas con 64 partes afectadas, pertenecientes a 26 entidades u organizaciones diferentes; inspecciones guiadas de activos y elementos mecánicos afectados; el asesoramiento y consejo de expertos técnicos en ciencias náuticas, ingeniería marítima, mecánica y arquitectura naval; y la determinación de distintas medidas de intensidad del peligro, se identificaron, sistematizaron y describieron los impactos de caídas piroclásticas y *pumice rafts* sobre varios elementos y sistemas de un buque tipo, y dos dominios o zonas portuarias distintas. Los impactos más significativos sobre los buques incluyeron: (1) efectos de carga estática vertical; (2) daños en superficies y equipamiento de cubierta; (3) ingreso de ceniza volcánica en espacios confinados; (4) daños en sistemas de energía, electrónica y computadoras; (5) pérdida de visibilidad, navegabilidad y posicionamiento; (6) obturación y daños en sistemas con tomas de *agua de mar*; (7) daños en sistemas de transmisión y propulsión; (8) obturación y daños en turbinas; y (9) abrasión, corrosión y crecimientos algales acelerados en cascos y obra viva. Los impactos más significativos sobre los puertos incluyeron: (1) interrupción de operatividades, por impactos en accesibilidades territoriales, servicios de infraestructura crítica, visibilidad atmosférica reducida, peligros para la salud de los operarios, tareas de limpieza, mantenimiento, remediación, etc.; (2) daños en maquinaria e infraestructura portuaria; (3) ingresos de *pumice rafts* en bahías portuarias; (4) englamamiento de *pumice rafts*; y (5) problemáticas de sedimentación y removilización de ceniza volcánica. En adición, también se evaluaron factores de peligrosidad, vulnerabilidad e impactos por eventos de removilización fluvial de tefra y deslizamientos subácueos y olas tipo tsunami asociadas.

Al investigar la correlación existente entre medidas de intensidad de peligro y grados de severidad de impactos asociados, se ha podido elaborar un nuevo modelo de vulnerabilidad (escala de impactos) para buques y puertos afectados por caídas primarias de ceniza volcánica y *pumice rafts*, basada en el diseño de *estados de daño* y *disrupción* disponibles para impactos de caídas de ceniza volcánica en sistemas de infraestructura crítica.

Además, evaluaron la efectividad y eficacia de distintas metodologías adoptadas para la prevención, mitigación y remediación de impactos, que incluyeron: (1) la restricción de la

navegación y el asilo de los buques; (2) diversas medidas de prevención de obturación de sistemas con tomas de *agua de mar* de los buques; (3) el despeje de ceniza volcánica de los buques; (4) el despeje de ceniza volcánica de los puertos; y (5) la contención de ingresos de *pumice rafts* en bahías portuarias y otros sitios críticos.

En tercera instancia, se propuso explorar posibles vías de transferencia de lecciones aprendidas a los sectores náutico y del manejo de la emergencia (**Capítulo 4**). A partir de una serie de recursos gráficos disponibles, destinados originalmente a resguardar sistemas de servicios de infraestructura crítica de Nueva Zelanda y luego internacionalizados por la comisión *Cities and Volcanoes Commission's Volcanic Ash Impacts Working Group* a través del *U.S. Geological Survey*, se conceptualizó una versión preliminar de afiche que condensara los contenidos elaborados en los capítulos anteriores, para asesorar a operarios de puertos y embarcaciones en caso de futuras caídas piroclásticas. Mediante el consenso de los posibles futuros usuarios, obtenido a partir de pequeños ensayos de testeo, consistentes en una segunda ronda de entrevistas de investigación semi-estructuradas y dirigidas con un subgrupo de 17 autoridades, operarios y tomadores de decisiones de 12 organismos diferentes; el asesoramiento técnico brindado por 3 profesionales expertos en ciencias náuticas, ingeniería marítima y mecánica naval; y la revisión por parte de 2 científicos expertos en riesgo volcánico, se elaboró el afiche “*Ceniza volcánica: avisos para el sector náutico (versión 1, junio de 2023)*”. Este nuevo dispositivo de transferencia condensa información referida a: (1) los distintos fenómenos asociados a la caída piroclástica primaria con capacidad de afectar el transporte naval; (2) los posibles impactos de la ceniza volcánica sobre los buques y los puertos; (3) acciones recomendadas para la preparación; (4) acciones recomendadas para la respuesta durante, y una vez finalizada, la caída piroclástica; y (5) el acceso a fuentes de aviso y material complementario. El afiche constituye una valiosa herramienta, única en su tipo, para la reducción del riesgo de desastres en el ámbito náutico ante eventos de caída piroclástica. El mismo ha sido transferido eficazmente a numerosas instituciones, organizaciones y entidades privadas de vinculadas al transporte naval de Patagonia andina.

Este trabajo de investigación pone de relieve la imperante necesidad de profundizar en el entendimiento del riesgo volcánico por caídas piroclásticas y otros peligros asociados para el transporte naval. Los resultados obtenidos proporcionan una perspectiva detallada respecto de los desafíos afrontados por las autoridades y comunidades costeras de Patagonia ante eventos de caída piroclástica, poniendo a disposición una serie de nuevos recursos destinados a la reducción del riesgo de desastres y a la construcción de la resiliencia entre las poblaciones costeras de Patagonia andina y regiones de características similares.

Palabras clave: PELIGROS VOLCÁNICOS; CENIZA VOLCÁNICA; PUMICE RAFTS; MANEJO DE LA EMERGENCIA; IMPACTOS; VULNERABILIDAD; ESTADOS DE DAÑO Y DISRUPCIÓN; MITIGACIÓN; COMUNICACIÓN DEL RIESGO; REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE; PUERTOS; EMBARCACIONES; NÁUTICA; HUDSON 1991; CHAITÉN 2008; CORDÓN CAULLE 2011-2012; CALBUCO 2015

Volcanic risk assessment from tephrafalls and associated hazards for nautical transport networks in Andean Patagonia

Abstract

The Argentine Patagonia is a territory recurrently affected by volcanic ashfalls, resulting from the explosive eruptions of active Andean volcanoes and the eastward dispersion of pyroclastic material transported by the regional flow of extra-tropical westerly winds. Over recent decades, four notably significant pyroclastic fall events have impacted the national territory, stemming from the eruptions of the Hudson (1991), Chaitén (2008), Cordón Caulle (2011-2012), and Calbuco (2015) volcanoes. Nautical transport has emerged as indispensable for managing various emergency scenarios across these instances, a trend mirrored in non-volcanic disaster contexts affecting the region. Paradoxically, however, nautical transport systems have also displayed notable vulnerability to the effects of pyroclastic falls and other associated volcanic hazards. Throughout Patagonia, these historical occurrences span over a century and include cases as severe as ships capsizing, the total disappearance of entire ports, and human casualties. Furthermore, it has been observed that impacts from these events persist for decades post-eruption, extending beyond the initially affected zones by primary pyroclastic fallout.

Despite these precedents, knowledge regarding the risk posed by explosive volcanic eruptions to nautical transport is exceedingly limited, contrasting starkly with the understanding available for other modes of transport such as aviation. The primary objective of this doctoral thesis is to address this knowledge gap, which surprisingly replicates on a global scale, by evaluating the complex interrelationships between volcanic phenomena and the emblematic nautical transport systems of the Argentine Patagonia. This has been achieved through the reconstruction and multimethodological analysis of numerous case studies, primarily encompassing four recent explosive volcanic eruptions and other emergency situations stemming from various geo-meteorological hazards.

The initial focus was on investigating the capability of nautical transport resources in the Andean Patagonia to respond effectively to different disaster situations (**Chapter 2**). Through reconnaissance visits to affected sites; semi-structured and role-driven research interviews with 52 affected parties from 24 different entities or organizations; and the consultation of complementary sources, a total of 19 case studies referring to emergency response nautical actions, associated with 5 distinct events, were reconstructed (**Anexo A**). Subsequently, these case studies underwent systematic categorization and comparison according to a novel model for typifying emergency response actions, grounded in eight basic functions of emergency management. The systematic analysis of these cases facilitated the identification of recurring issues that impede effective

management of such situations through nautical means. These issues were categorized into five main aspects: (1) hazard-related issues; (2) territorial accessibility-related issues; (3) intra- and inter-organizational-related issues; (4) demographic issues; and (5) vulnerabilities of nautical transport systems to pyroclastic falls and associated hazards. Building on these findings, a series of replicable recommendations, aligned with the fundamental principles of disaster management, were formulated to enhance the planning and response capabilities of naval resources in anticipation of future eventualities.

Secondly, the multiple negative effects, or impacts, of pyroclastic fallouts on each constituent of a nautical transport network were investigated (**Chapter 3**). Through reconnaissance visits to affected sites; semi-structured and role-driven interviews with 64 affected parties from 26 different entities or organizations; guided inspections of impacted assets and mechanical components; consultation with technical experts proficient in nautical sciences, maritime engineering, mechanical, and naval architecture; and the determination of various hazard intensity metrics, the impacts of pyroclastic falls and pumice rafts on various components and systems of a prototypical vessel, as well as two distinct port domains or zones, were identified, systematized, and delineated. The most notable impacts on ships comprised: (1) effects of vertical ash-loading on ships' seaworthiness; (2) damage to deck surfaces and equipment; (3) volcanic ash ingress into ships' interiors; (4) damage to power systems, electronic devices, and computers; (5) loss of visibility, navigability, and positioning; (6) blockage and damage to systems dependent on *sea water* supplies; (7) damage to propulsion and transmission systems; (8) blockage and damage to waterjets; and (9) accelerated abrasion, corrosion, and algal growth on hulls and underwater structures. The most notable impacts on ships comprised: (1) disruption to port logistics, due to impacts on territorial accessibilities, critical infrastructure services, reduced atmospheric visibility, health hazards for operators, cleaning, maintenance, and remediation works, etc.; (2) effects on port machinery and infrastructure; (3) entry of pumice rafts into harbors; (4) freezing of pumice rafts; and (5) sedimentation and remobilization of volcanic ash issues. Furthermore, the impacts and hazard and vulnerability characteristics from fluvial-remobilized tephra and subaqueous mass-wasting processes and tsunami-like waves were to water transport were also assessed.

When exploring the relationship between hazard intensity metric and the severity levels of associated impacts, a new vulnerability model (a common impact scale) has been devised for ships and ports affected by primary volcanic ashfalls and pumice rafts. This model is founded on the design of available damage and disruption states for volcanic ashfall impacts on critical infrastructure systems.

Furthermore, the effectiveness and efficiency of various methodologies employed for the prevention, mitigation, and remediation of impacts were assessed. The most notable methodologies comprised: (1) cessation of shipping activities and housing ships; (2) preventing blockage and damage to systems dependent on *sea water* supplies; (3) volcanic ash removal from ships; (4) volcanic ash removal from ports; and (5) preventing pumice rafts entries into harbors and other critical sites.

Thirdly, potential avenues for transferring lessons learned to the nautical and emergency management sectors were explored (**Chapter 4**). Based on a series of graphical resources originally focused on critical infrastructure service systems in New Zealand and then globalized by the *Cities and Volcanoes Commission's Volcanic Ash Impacts Working Group* through the *U.S. Geological Survey*, a preliminary version of a poster was conceptualized. This poster aimed to condense the contents elaborated in the previous chapters to provide guidance to port operators and vessel crews in the event of future pyroclastic falls. Through consensus among potential future users, derived from small testing trials consisting of a second round of semi-structured and role-driven interviews with a subgroup of 17 authorities, operators, and decision-makers from 12 different organizations; technical advice provided by 3 professionals expert in nautical sciences, maritime engineering, and naval mechanics; and review by 2 volcanic risk experts, the poster "*Volcanic Ash: Notices for the Maritime Sector (Version 1, June 2023)*" was developed. This new transfer device encapsulates information regarding: (1) the various phenomena associated with primary pyroclastic fall capable of affecting naval transportation; (2) potential impacts of volcanic ash on ships and ports; (3) recommended preparedness actions; (4) recommended response actions during and after the pyroclastic fall; and (5) access to warning sources and supplementary material. The poster constitutes a valuable, one-of-a-kind tool for disaster risk reduction in the maritime domain amid pyroclastic fall events. To date, the poster has been effectively transferred to numerous institutions, organizations, and private entities linked to Andean Patagonia's nautical transport.

This research underscores the pressing need to deepen our understanding of volcanic risk posed by pyroclastic falls and other associated hazards for nautical transport. The findings provide a detailed perspective on the challenges faced by authorities and coastal communities in Patagonia when dealing with pyroclastic fall events, offering a range of new resources aimed at disaster risk reduction and resilience building among coastal populations in the Andean Patagonia and similar regions.

Keywords: VOLCANIC HAZARDS; VOLCANIC ASH; PUMICE RAFTS; EMERGENCY MANAGEMENT; IMPACTS; VULNERABILITY; DAMAGE AND DISRUPTION STATES; MITIGATION; RISK COMMUNICATION; DISASTER RISK REDUCTION; PORTS; SHIPS; NAUTICAL; HUDSON 1991; CHAITÉN 2008; CORDÓN CAULLE 2011-2012; CALBUCO 2015.

Financiamiento

La realización de la presente tesis doctoral ha sido posible gracias al financiamiento brindado por:

Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica

Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica PICT 2020 2245 (2022 - 2025). *Movimientos en masa subacuáticos: origen, peligrosidad y recurrencia de procesos tsunamigénicos en grandes lagos patagónicos*. Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, FONCyT, MINCyT.

Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica PICT 2016-0084 (2017 - 2020). *Las caídas piroclásticas como eventos de disturbio en sistemas fluviales y fluvio-lacustres de Patagonia Norte: análisis de impactos y recurrencia*. Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, FONCyT, MINCyT.

Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica PICT 2015-1322 (2017 - 2020). *Deslizamientos subacuáticos en deltas lacustres en el contexto de la evaluación de peligrosidad de tsunamis: hacia una gestión del riesgo en localidades costeras de los grandes lagos patagónicos*. Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, FONCyT, MINCyT.

Consejo Federal de Ciencia y Tecnología

Proyecto de Apoyo Tecnológico al Sector Turismo, ASETUR (2019 - 2023). *Desarrollo de un circuito Turístico Científico educativo en el Predio Ing. Roberto Harán en la Ciudad de San Carlos de Bariloche*. COFECyT, Consejo Federal de Ciencia y Tecnología, MINCyT.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

Beca Interna Doctoral para Temas Estratégicos (2018 - 2024). *Análisis de peligrosidad y vulnerabilidad frente a caídas de cenizas volcánicas en Patagonia Norte en contexto de cambio climático*. CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.

Proyecto Estratégico de Unidades Ejecutoras PUE 2018 229201801 00052 CO - IPATEC, Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales, CONICET/UNCO (2019 - 2024). *Tecnologías biológicas y geoambientales para el uso sustentable del territorio y el desarrollo de bioeconomías regionales en la Norpatagonia Andina*. CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.

Proyecto de investigación plurianual PIP 11220200102980 CO (2021 - 2023). *Caídas de tefra recientes en cuencas fluvio-lacustres de Patagonia norte: un enfoque source to sink*. CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.

Universidad Nacional del Comahue

Proyecto de Investigación PIN1 04/B258 (2023 - 2026). *Volcanismo, remoción en masa y tsunamis lacustres en Norpatagonia andina: un enfoque multidisciplinario*. CRUB, Centro Regional Universitario Bariloche; UNCO, Universidad Nacional del Comahue.

Proyecto de Investigación PIN1 04/B226 (2018 - 2022). *Problemáticas ambientales asociadas a volcanismo explosivo y fenómenos tsunamigénicos en Norpatagonia Andina: hacia la reducción de la vulnerabilidad*. CRUB, Centro Regional Universitario Bariloche; UNCO, Universidad Nacional del Comahue.



Producción

La realización de la presente tesis doctoral ha derivado en la publicación de los siguientes artículos de investigación científica:

Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D. & Outes, V. (2022). Water evacuations in remote tourist regions: evaluating case studies from natural hazards in North Patagonian lakes, Argentina. *Journal of Mountain Science*, 19 (6): 1782-1807. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11629-021-7207-3>

Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D., Outes, V., Stewart, C. & Baranzini, F. (2023). Impacts on water transport networks after three widespread volcanic ashfalls in Andean Patagonian lakes. *Volcanica*, 6 (2): 173-200. <https://doi.org/10.30909/vol.06.02.173200>

Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D. & Outes, V. (2024). Communicating recommendations for the nautical sector in the event of volcanic ashfall. *Boletín Geográfico*, 46 (46): 13-30. <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/4941>

La realización de la presente tesis doctoral ha derivado en la publicación de los siguientes resúmenes presentados en distintos eventos científico-tecnológicos:

Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D., Outes, V., Stewart, C. & Baranzini, F. (2024). A hundred years of ships and eruptions in Patagonia: addressing the complex interplays between volcanic crises and nautical transport. *Cities on Volcanoes 12*, February 2024, Antigua, Guatemala.

Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D., Outes, V., Wilson, T. M. & Baranzini, F. (2022). Impactos de ceniza volcánica sobre sistemas de transporte lacustre en Patagonia andina. XXI Congreso Geológico Argentino, marzo de 2022, Puerto Madryn, Chubut, Argentina. <https://cga2022.com/files/LIBRO DE ACTAS XXI CGA 2022.pdf>

Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D. & Outes, V. (2022). El transporte lacustre en Patagonia andina para el manejo de la emergencia volcánica y otros escenarios de peligro. XXI Congreso Geológico Argentino, marzo de 2022, Puerto Madryn, Chubut, Argentina. <https://cga2022.com/files/LIBRO DE ACTAS XXI CGA 2022.pdf>

Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D., Outes, V. & Wilson, T. M. (2022). Water transport for managing disasters: insights from the remote and touristic Patagonian lakes, Argentina. *Cities on Volcanoes 11*, June 2022, Heraklion, Crete, Greece. <https://citiesonvolcanoes11.com/>

Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D., Outes, V., Wilson, T. M. & Stewart, C. (2022). Volcanic ash impacts on water transport networks after three widespread tephrafalls in Patagonian lakes,

Argentina. Cities on Volcanoes 11, June 2022, Heraklion, Crete, Greece.
<https://citiesonvolcanoes11.com/>

Salgado, P. A., Wilson, T. M., Beigt, D., Outes, V. & Villarosa, G. (2020). Vulnerabilidad ante caídas de tefra recientes en Patagonia Norte: Influencia de factores climáticos e implicancias en el contexto de proyecciones de cambio climático. Primer Congreso de la Asociación Latinoamericana de Volcanología (ALVO), noviembre de 2019, Antofagasta, Chile.
<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/179459>

Salgado, P. A., Outes, V., Beigt, D. & Villarosa, G. (2018). Influencia de parámetros climáticos y ambientales sobre factores de peligrosidad y vulnerabilidad ante eventos de caídas de ceniza volcánica en Patagonia Norte. Séptimo Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, septiembre de 2018, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
<http://www.fcn.unp.edu.ar/sitio/naturalia/wp-content/uploads/2018/09/Naturalia-Patagonica-Vol-10-2018.pdf>

Índice

Resumen.....	II
Abstract	V
Financiamiento.....	VIII
Producción	X

CAPÍTULO 1 - Introducción

1.1. Fundamentos & antecedentes	1
1.2. Objetivos generales	3
1.3. Metodologías	4
1.3.1. Entrevistas de investigación semi-estructuradas	4
1.3.2. Observaciones de campo en sitios afectados	5
1.3.3. Otras fuentes de datos complementarios.....	5
1.3.4. Sistematización de acciones de respuesta a la emergencia.....	6
1.3.5. Escalas de Impactos.....	6
1.4. Sobre los sistemas de transporte naval	6
1.4.1. La navegación interna en Patagonia	7
1.4.2. Los buques.....	9
1.4.3. Los puertos	10
1.5. Sobre el riesgo volcánico & el área de estudio	13
1.5.1. El volcanismo andino activo	13
1.5.2. El flujo regional de vientos del oeste	15
1.5.3. El peligro de las caídas piroclásticas.....	16
1.6. Sobre los casos de estudio	22
1.6.1. La erupción del volcán Hudson de 1991	22
1.6.2. La erupción del volcán Chaitén de 2008	25
1.6.3. La erupción del Cordón Caulle de 2011-2012	28
1.6.4. La erupción del volcán Calbuco de 2015	32
1.6.5. Otros antecedentes de desastre	35

CAPÍTULO 2 - Evacuaciones náuticas: el transporte naval para el manejo de emergencias

2.1. Marco de investigación.....	36
2.1.1. Antecedentes	37
2.1.2. Objetivos específicos.....	40
2.1.3. Metodologías específicas	41

2.2. Casos de estudio – Introducción al Anexo A	42
2.3. Sistematización de casos de estudio.....	42
2.4. Identificación de problemáticas recurrentes.....	46
2.4.1. Aspectos asociados al peligro.....	46
2.4.2. Aspectos asociados a accesibilidades territoriales.....	48
2.4.3. Aspectos organizacionales	51
2.4.4. Aspectos demográficos	53
2.4.5. Aspectos de vulnerabilidad de los sistemas de transporte naval	55
2.5. Discusión	56
2.6. Recomendaciones	58

CAPÍTULO 2 (ANEXO A) - Casos de estudio: acciones de respuesta naval en situación de emergencia

A1. La erupción del volcán Hudson de 1991	60
A1.1. Evacuaciones y auxilio en alrededores del Lago General Carrera/Buenos Aires	60
A2. La erupción del volcán Chaitén de 2008	62
A2.1. Evacuación marítima de Chaitén	62
A2.2. Evacuaciones y auxilio en Los Alerces.....	64
A3. La erupción del Cordón Caulle de 2011-2012.....	65
A3.1. Evacuaciones vehiculares.....	65
A3.1.1. En Chile: en la Región de Los Ríos y Los Lagos.....	65
A3.1.2. En Argentina: en Villa La Angostura.....	66
A3.2. Huida del refugio de montaña El Dormilón	67
A3.3. Evacuaciones y auxilio del Perilago.....	67
A3.3.1. Intentos de rescate de pobladores	68
A3.3.2. Acciones de asistencia social y rural	70
A3.4. Varamiento en Puerto Blest.....	72
A3.5. Evacuaciones y auxilio en el Lago Traful	74
A3.5.1. Intento de rescate de pobladores del Pichi Traful.....	74
A3.5.2. Intento de rescate de pobladores desde Villa Traful.....	75
A3.5.3. Situación post evento	76
A3.6. Auxilio en los alrededores de los Lagos Lácar & Nonthué	77
A4. La erupción del volcán Calbuco de 2015.....	77
A4.1. Auxilio en los alrededores de los Lagos Lácar & Nonthué	77
A4.2. Riesgo de aislamiento en el Lago Huechulafquen & Epulafquen.....	79
A5. La crisis geo-meteorológica del invierno de 2019 en Villa La Angostura.....	80
A5.1. Evacuación nocturna de visitantes diurnos	82

A5.2. Movilización de transientes y residentes varados (en catamaranes)	83
A5.3. Movilización de transientes y residentes varados (en transportes diferenciales).....	85
A5.4. Continuación del transporte	86

CAPÍTULO 3 - Impactos de ceniza volcánica en el transporte naval

3.1. Marco de investigación.....	88
3.1.1. Antecedentes	89
3.1.2. Objetivos específicos	90
3.1.3. Metodologías específicas	90
3.2. Impactos en el buque	92
3.2.1. Efectos de carga estática vertical	92
3.2.2. Daños en superficies & equipamiento de cubierta	93
3.2.3. Ingreso de ceniza en espacios confinados	95
3.2.4. Daños en sistemas de energía, electrónica & computadoras	95
3.2.5. Pérdida de visibilidad, navegabilidad & posicionamiento.....	96
3.2.6. Obturación & daño en sistemas de refrigeración	97
3.2.7. Daños en sistemas de propulsión & transmisión	101
3.2.8. Obturación & daño en turbinas.....	103
3.2.9. Abrasión, corrosión & crecimientos algales acelerados en cascos	104
3.3. Impactos en el puerto.....	105
3.3.1. Disrupción de operatividades.....	105
3.3.2. Daños en maquinaria & infraestructura.....	106
3.3.3. Ingreso de pumice rafts en bahías	106
3.3.4. Englamamiento de pumice rafts	108
3.3.5. Problemáticas de sedimentación & removilización de ceniza volcánica	108
3.4. Otras fuentes de peligro asociadas.....	111
3.4.1. Impactos por removilización fluvial de ceniza volcánica.....	111
3.4.2. Impactos por deslizamientos subácueos & olas tipo tsunami	114
3.5. Prevención, mitigación & remediación de daños	118
3.5.1. Restricción de la navegación & asilo de buques	118
3.5.2. Prevención de obturación de sistemas con toma de agua de mar	118
3.5.3. Despeje de ceniza del buque.....	119
3.5.4. Despeje de ceniza del puerto	120
3.5.5. Prevención de ingresos de pumice rafts en bahías	121
3.6. Evaluación & modelado de impactos.....	123
3.6.1. Grados de Severidad de Impacto (GSI).....	123
3.6.2. Medidas de Intensidad del Peligro (MIP)	124

3.6.3. Estados de Daño & Disrupción (EDD) y Escalas de Impactos (EI)	125
3.7. Discusión	137
 CAPÍTULO 4 - Transferencia de aprendizajes para el manejo integral de caídas piroclásticas	
4.1. Marco de investigación.....	140
4.1.1. Antecedentes	141
4.1.2. Objetivos específicos	143
4.2. Elaboración de un nuevo dispositivo de transferencia	143
4.2.1. Conceptualización del afiche	144
4.2.2. Consenso de posibles usuarios.....	144
4.2.3. Revisión de expertos & Asesoramiento técnico.....	145
4.3. Resultados: afiche Ceniza volcánica, avisos para el sector náutico.....	145
4.3.1. Las partes del afiche	145
4.4. Transferencia	148
4.5. Discusión	149
 CAPÍTULO 5 - Consideraciones finales	
5.1. Resumen de conclusiones	151
5.2. Agradecimientos	156
5.3. Referencias	158

Capítulo 1

Introducción

1.1. Fundamentos & antecedentes

Los *sistemas de infraestructura crítica*, también conocidos como *líneas vitales*, son un conjunto de servicios públicos básicos, cruciales para el funcionamiento cotidiano de una sociedad (Dunn et al. 2013), como lo son el suministro de energía eléctrica, el suministro de agua potable, el manejo de aguas residuales, los sistemas de transporte, las comunicaciones, los sistemas de climatización, etc. (Platt 1991). De estos servicios dependen cuestiones tan básicas como la economía, la salud, la seguridad y el bienestar de las personas en una sociedad (Rinaldi et al. 2001).

En situaciones de emergencia, los sistemas de infraestructura crítica resultan ser de extrema importancia, ya que permiten a las poblaciones sobrellevar la situación de desastre. Pero, a su vez, la funcionalidad de los mismos sistemas de infraestructura crítica puede verse afectada por los distintos peligros naturales que afectan a la población (Perry & Lindell 2004, 2007; Phillips 2013; Peyravi et al. 2021).

Entre todos los sistemas de infraestructura crítica, el transporte es justamente uno de los servicios más expuestos a los efectos negativos de los peligros naturales, debido a la vastedad de territorio que ocupan rutas viales, ferroviarias, aéreas o náuticas. De igual manera, esto se extiende también para el caso particular de los peligros volcánicos (Wilson et al. 2014a). A lo largo de la historia existen numerosos antecedentes que registran cómo distintos sistemas y modos de transporte han sido impactados por la actividad volcánica (Blong 1984; Wilson et al. 2014a).

Entre estos casos, predominan ampliamente los impactos provocados por las *caídas de ceniza volcánica* (*s. ampl.*) o *caídas piroclásticas* (*s. estr.*) (Newhall & Hoblitt 2002). Esto es porque la *ceniza* (*s. ampl.*) o *tefra* es el producto volcánico con mayor potencial de dispersión (Dingwell et al. 2012), el cual puede cubrir amplias extensiones del territorio y afectar a las distintas redes de transporte que lo atraviesan (Wilson et al. 2012a), sean estas terrestres, incluyendo el transporte vial y ferroviario (Blong 1984; Blake 2016; Blake et al. 2017, 2018), aéreas (Casadevall 1994; Guffanti et al. 2008, 2009, 2010; Prata & Rose 2015) y también, particularmente, los sistemas de transporte naval (este trabajo). Si bien raramente significan una amenaza directa para la vida humana (Horwell & Baxter 2006; Stewart et al. 2006) la caída de unos muy pocos milímetros de ceniza puede desencadenar una pluralidad de impactos severos y perdurables sobre los sistemas de transporte.

Además, muchos otros sectores de la sociedad pueden verse afectados de forma indirecta a causa de una caída de ceniza volcánica, debido a la interdependencia que existe entre estos sectores y el transporte (Sword-Daniels et al. 2011).

Conocer las posibles consecuencias de una erupción volcánica explosiva sobre el transporte es un aspecto crítico para la sociedad en varios sentidos (Perry & Lindell 2007). Esto es porque durante una situación de emergencia una red de transporte funcional permitirá operaciones fundamentales como lo es: (1) desplazar a las personas, los animales y los bienes materiales fuera del alcance del peligro o amenaza (Perry 1985; Lindell et al. 2006; Tomsen et al. 2014); (2) movilizar a los respondientes y elementos de primeros auxilios hacia los sitios afectados para brindar auxilio y asistir a las personas damnificadas o refugiadas (Chakraborty et al. 2005; Lindell et al. 2006; Haynes et al. 2009); y (3) remediar y recuperar sitios afectados en coyunturas de post evento (Lindell & Perry 1992; Perry & Lindell 2007; Amdal & Swigart 2010; Phillips 2013).

En Patagonia, existen numerosos registros históricos que documentan cómo varias erupciones volcánicas andinas han afectado el transporte naval de la región. Estos antecedentes centenarios pueden remontarse a más de un siglo atrás, cuando la erupción del Cordón Caulle de 1921-1922 (VEI: 3; Gerlach et al. 1988; Lara et al. 2006; Singer et al. 2008) interrumpió la navegación de los lagos Puyehue y Todos Los Santos (Chile) impactando puertos y embarcaciones en sus alrededores (Petit-Breuilh 1995; **Figura 1.1**). De manera similar, muchas otras erupciones explosivas han afectado recurrentemente el transporte interno de Patagonia hasta el presente. Estos casos incluyen instancias tan extremas como el hundimiento de embarcaciones, la desaparición de puertos e, incluso, la pérdida asociada de vidas humanas.



Figura 1.1. Compilación de fragmentos periodísticos del diario La Nación (14 al 22 de diciembre de 1921) que informan sobre la erupción del Cordón Caulle de 1921 y la consiguiente caída de ceniza volcánica sobre territorio nacional. Cortesía de la Hemeroteca de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

En décadas recientes, cuatro eventos muy significativos de caída de ceniza volcánica (VEI ≥ 4 ; Newhall & Self 1982) cubrieron gran parte del territorio patagónico argentino. Estas caídas piroclásticas impactaron sobre decenas de puertos y cientos de embarcaciones, y urgieron la necesidad de evacuar o auxiliar a la población por vías náuticas con muchos casos de éxito, pero con muchos otros de fracaso. Esto fue debido al efecto negativo que tiene la ceniza volcánica para los buques, los puertos y la navegación. Más aun, la removilización de los inmensos depósitos de tefra producidos por estas erupciones continúa representando un factor de peligrosidad para los buques que transitan la región, incluso a más 12 años de la reconocida erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 (VEI ~ 4 -5; Bonadonna et al. 2015a).

En este tiempo, la importancia del transporte naval para el manejo de emergencias se hizo todavía más evidente a partir de muchos otros casos de desastre, desencadenados por múltiples eventos de origen *no-volcánico*, como incendios de interfase, procesos de remoción en masa, eventos de clima extremo, etc. Y a pesar de que las evacuaciones (*s. ampl.*) son prácticas de respuesta muy frecuentes, sorprende que a escala global no existan antecedentes que evalúen la viabilidad del recurso naval para gestionar situaciones de emergencia. De mismo modo, también sorprende que el conocimiento acerca de los efectos de la actividad volcánica sobre los buques y los puertos sea extremadamente limitado, o apenas incipiente en la literatura náutica (Cragg 2022), volcanológica (Salgado et al. 2023) y del manejo de la emergencia (Salgado et al. 2022). Incluso, muy a pesar de la recurrencia y gravedad de estos antecedentes que se replican a escala global, las lecciones aprendidas a partir de estos antecedentes no han, sorprendentemente, catalizado la consignación de registros escritos o la elaboración de protocolos de respuesta, ni ninguna otra medida de preparación frente a nuevas erupciones volcánicas (Salgado et al. 2024). Colectivamente, todas estas cuestiones motivaron el planteo de los siguientes objetivos generales y el desarrollo del presente trabajo de investigación.

1.2. Objetivos generales

Este trabajo se construye alrededor de tres objetivos de investigación principales, que se abordan seguidamente en tres capítulos distintos:

- Evaluar la capacidad de los sistemas de transporte naval de Patagonia para dar respuesta a situaciones de emergencia volcánica y otros tipos de desastre (**Capítulo 2**).
- Sistematizar los múltiples efectos negativos (*impactos*) de la ceniza volcánica sobre cada uno de los elementos que constituyen una red de transporte naval (barcos y puertos), investigando su correlación con distintas intensidades de peligro y evaluando la efectividad de distintas acciones de prevención, mitigación y remediación de daños (**Capítulo 3**).
- Explorar y consignar herramientas de transferencia efectiva de lecciones aprendidas a los sectores náutico y del manejo de la emergencia de Patagonia para futuros casos de caídas piroclásticas (**Capítulo 4**).

1.3. Metodologías

El presente trabajo de investigación adopta un enfoque de métodos mixtos para el relevamiento y análisis de la información (cualitativa y cuantitativa) referida a la gestión de desastres; impactos de peligros volcánicos; medidas de prevención, mitigación y remediación de impactos; distintas medidas de intensidad de los peligros volcánicos; y el desarrollo de herramientas para la transferencia de lecciones aprendidas.

El *relevamiento* de información se basó principalmente en: (1) la realización de entrevistas de investigación dirigidas y semi-estructuradas; (2) observaciones de campo en sitios afectados; y (3) la consulta de fuentes de datos complementarios. La *organización* y el *análisis* de la información relevada se basaron principalmente en: (1) nuevas metodologías para la sistematización de acciones de respuesta naval a la emergencia; y (2) el uso y desarrollo de nuevas escalas de impactos para sistemas de infraestructura crítica. A continuación, se elabora sobre cada uno de estos métodos. Los detalles referidos a la aplicación de cada metodología se presentan seguidamente en los capítulos pertinentes.

1.3.1. Entrevistas de investigación dirigidas & semi-estructuradas

Las *entrevistas de investigación* (Beaud 2018) son herramientas fundamentales de la investigación cualitativa (p. ej., Köhler et al. 2023) y consisten en intercambios verbales orientados intencionalmente por objetivos cognitivos preestablecidos. Estas herramientas permiten realizar reconstrucciones fácticas y documentales sobre casos de estudio donde la observación directa y sincrónica no sea posible (Dunn 2000; Kvale 2008; Denzin & Lincoln 2012).

Las entrevistas *semi-estructuradas* son un tipo particular de entrevista de investigación (p. ej., Longhurst 2016). Al igual que las entrevistas estructuradas, consisten en una serie de preguntas preestablecidas (*basada en guías*; Bennett 2002; Crang 2002; Cloke et al. 2004) que se diseñan con anticipación según un esquema de temáticas o variables de observación que se pretende investigar (*estandarizada*; Strong et al. 2020). Pero, a diferencia de las entrevistas estructuradas, las entrevistas semi-estructuradas se caracterizan por garantizar el diálogo espontáneo y la libre discusión de temáticas no preestablecidas, posibilitando incursionar con pensamiento creativo en temáticas por fuera la formulación original de la entrevista (*estandarizada y abierta*; Longhurst 2016; Strong et al. 2020). Este tipo particular de entrevista se diseña en base a objetivos específicos de investigación (**sección 2.1.2; sección 3.1.2; sección 4.1.2**) y usualmente se ordenan en una progresión de temáticas más generales (*preguntas de sondeo o introductorias*) a más específicas (*preguntas directas; de especificación; de profundización*) (Kitchin & Tate 2000). Aquí, el planteo de los objetivos y el diseño de las entrevistas se basaron en la investigación de antecedentes y trabajos homólogos (p. ej., otros sistemas de infraestructura crítica) y fueron asesorados por técnicos expertos en las distintas temáticas (**sección 2.1.1; sección 3.1.1; sección 4.1.1**).

La elección del grupo de personas a entrevistar se basó en la pertinencia (participación, intervención o involucramiento) del informante en cada situación o caso de estudio (*role-driven*

interviews; Heckathorn 1997, 2002; Salganik & Heckathorn 2004) (**sección 2.1.3**; **sección 3.1.3**; **sección 4.2**). El diseño de las entrevistas mantuvo la flexibilidad necesaria para no abordar a todos los informantes en los mismos términos, sino que se permitió adaptar las preguntas a las características de la entrevista y los conocimientos previos del entrevistado/entrevistador sobre cada área y caso de estudio.

En su amplia mayoría, las entrevistas se realizaron de forma presencial en el sitio de los hechos, o en el lugar de trabajo del informante, y en todos los casos que fuera posible o necesario, se continuaron vía telecomunicaciones y formularios *online* (Madge 2010; Kinsley 2013, 2014; Adams-Hutcheson & Longhurst 2016). Los instrumentos de registro contemplaron principalmente grabaciones de voz, previamente consensuadas con los informantes, garantizando la confidencialidad de estas y explicando el uso que se le dará a la información colectada. No se requirió permiso ético ya que los entrevistados participaron en su rol profesional y sólo se discutieron temas técnicos. Esta información se complementó con notas manuscritas, fotografías y filmaciones, adquiridas en el momento o facilitadas por los informantes. Las transcripciones de las entrevistas se realizaron de forma inmediata, organizando la información en matrices de datos (Longhurst 2016; Strong et al. 2020).

1.3.2. Observaciones de campo en sitios afectados

En adición a la realización de entrevistas (**sección 1.3.1**), el trabajo de campo también incluyó visitas de reconocimiento post-evento, en sitios afectados por caídas de ceniza volcánica u otros tipos de peligros. Los principales sitios donde se relevaron datos de respuestas a la emergencia o impactos de ceniza volcánica (puertos, muelles y marinas de Patagonia) se enlistan y describen más adelante (**sección 1.4.3**). En muchos casos, tanto las entrevistas como las visitas de reconocimiento incluyeron inspecciones guiadas por técnicos expertos en mecánica y náutica, a través de las instalaciones, maquinarias, sistemas, elementos o activos afectados por las sucesivas caídas piroclásticas.

Las tareas de campo también involucraron la medición de espesores de caída primaria de ceniza volcánica, durante la caída o tiempo después, y de otros tipos de depósitos removilizados de tefra, sea por agentes eólicos, fluviales o lacustres. Esto permitió obtener datos referidos a distintas *medidas de intensidad del peligro*, o MIP (*Hazard Intensity Metrics*; Schmidt et al. 2011; Smith 2013; Wilson et al. 2014a) de primera mano y caracterizar la evolución de los depósitos de ceniza sujetos a la removilización (**sección 3.6.2**).

1.3.3. Otras fuentes de datos complementarios

La información recopilada mediante entrevistas (**sección 1.3.1**) y observaciones de campo (**sección 1.3.2**) se complementó con consultas bibliográficas de informes técnicos inéditos; y la reconstrucción de sucesos a partir de reportes de medios de comunicación oficiales (**sección 2.1.3**; **sección 3.1.3**).

Por último, y en adición a todo esto, cabe destacar que el Grupo de Estudios Ambientales (Grupo GEA IPATEC, CONICET/UNCO) que integra el autor del presente trabajo de investigación,

cuenta con amplia experiencia en la investigación de la fenomenología y los impactos de distintos peligros naturales que recurrentemente afectan Patagonia andina. El grupo también cuenta con amplia experiencia en la participación colaborativa de Centros de Operaciones de Emergencia (COEs) locales y el asesoramiento para tomadores de decisiones y autoridades locales, provinciales y nacionales. Estas labores se enmarcan en proyectos de investigación y extensión más amplios, algunos en curso (ver página de financiamiento) y muchos otros iniciados incluso antes de la crisis asociada a la erupción del volcán Chaitén de mayo de 2008 (**sección 1.5.2**).

1.3.4. Sistematización de acciones de respuesta a la emergencia

La literatura sobre la gestión de desastres ofrece múltiples criterios para caracterizar las distintas fases que componen una respuesta a la emergencia. Sin embargo, carece de metodologías integrales disponibles que permitan sistematizar, y por consiguiente evaluar, distintas acciones de respuesta (Salgado et al. 2022). Para esto fue necesario proponer un nuevo modelo que permita tipificar operativos náuticos para el manejo de emergencias, desde instancias tempranas como la implementación de estrategias de preparación hasta la recuperación de sitios afectados. Este nuevo modelo se compone de una tipología de ocho funciones básicas del manejo de emergencias y los detalles acerca de cómo se elaboró están debidamente desarrollados en la **sección 2.3**.

1.3.5. Escalas de Impactos

Las *escalas de impactos (EI)* son herramientas que se utilizan principalmente para ordenar las consecuencias de determinadas eventualidades, acciones o fenómenos. En el contexto de desastres y emergencias, las EI se suelen utilizar para sistematizar los efectos de uno o varios peligros sobre distintos sectores como la infraestructura edilicia, los servicios de infraestructura crítica, la economía, la salud humana, el medio ambiente, etc. (Blong 2003a). En algunos casos particulares, las EI permiten relacionar distintos grados de severidad de los impactos con medidas de intensidad del peligro (p. ej., **sección 3.6**). Estas escalas son sumamente efectivas para ordenar, comunicar, evaluar y condensar un gran volumen de información cualitativa referida a impactos en marcos más cuantitativos.

En volcanología existen numerosas EI, u otros marcos similares, para describir las consecuencias de los peligros volcánicos en distintos sectores (p. ej., Spence et al. 1996; 2004; Neild et al. 1998; Blong 2003a; Baxter et al. 2005; Wilson et al. 2009a, 2014a; Jenkins et al. 2015; Hayes et al. 2015; etc.). Con el objetivo de sistematizar los múltiples impactos de la ceniza volcánica sobre los buques y los puertos, en este trabajo de investigación se elabora una nueva EI basada en las Escalas de Daño y Disrupción propuestas por Wilson et al. (2014a) para sistemas de infraestructura crítica por distintos tipos de peligros volcánicos, incluyendo las caídas piroclásticas. Este nuevo modelo de impactos se describe y presenta en la **sección 3.6**.

1.4. Sobre los sistemas de transporte naval

La navegación ha significado para las sociedades un modo de desplazamiento sumamente eficaz en relación con el transporte terrestre, teniendo en cuenta que el planeta se encuentra cubierto por agua en sus dos terceras partes, lo que ha resultado vital para el desarrollo de distintas

civilizaciones a lo largo de la historia (Burns-Kokkinaki 2004; Davis 2013; Hellenic Maritime Museum 2013; Burns 2018). En la actualidad el transporte naval de pasajeros ha perdido mucha de su importancia original, sobre todo a partir de la aparición de la aviación comercial. Sin embargo, debido a su gran capacidad de carga, este modo de transporte continúa siendo una parte esencial de la economía global, constituyendo alrededor de un 80% del comercio internacional (UN-CTAD 2020).

Existen dos variantes fundamentales de transporte naval: el que se desarrolla a través de mares, vías oceánicas o canales marítimos (*transporte marítimo*) y el que se desarrolla a través de cursos, canales y cuerpos de agua continentales, naturales o artificiales (*transporte interior o fluvio-lacustre*). Si bien es el transporte marítimo el medio que ha sido considerado tradicionalmente como el principal recurso para la movilización de materia prima y partes o productos terminados a gran escala (Song & Panayides 2015), el transporte interno también representa un medio sumamente efectivo para el comercio a escalas regionales (Branch & Robarts 2014; UNCTAD 2020) e incluso un recurso fundamental para movilizar cargas y personas en zonas con accesibilidades territoriales limitadas (D'Ercole & Metzger 2009). Sea por vías marítimas o interiores, el transporte naval es también el único medio por el cual se realizan algunas actividades con alto grado de especialización, como lo son la pesca, la investigación, ejercicios y acciones militares e incluso actividades con propósitos recreacionales (UN-CTAD 2006).

La función básica de cualquier red de transporte naval puede ser esquematizada, en términos generales, como el desplazamiento de personas (*pasajeros*), animales y mercancías (*carga*) por medio de distintos tipos de vehículos, capaces de flotar y ser dirigidos por el hombre (*buque*) a través de distintos entornos (*vías navegables, marítimas o fluvio-lacustres*); o el ejercicio de cualquier otra operación especializada, sustentada en el ámbito acuático (Ley 20.094; REGINAVE 2019). A su vez, independientemente de su finalidad, toda operación naval precisa de distintas facilidades o infraestructura (*puerto*) en la interfase entre la tierra y el agua (Ley 24.093; REGINAVE 2019) que: (1) brinde servicios básicos; (2) permita el seguro fondeo, atraque, desatraque y permanencia de los buques, u otros artefactos navales; (3) facilite el embarco y desembarco de cargas y pasajeros; y (4) posibilite la interconectividad con otros modos de transporte, sean terrestres, aéreos o mismo otras vías navegables (Branch & Robarts 2014; Song & Panayides 2015; Burns 2018).

1.4.1. La navegación interna en Patagonia

La mayor parte de los recursos navales de Patagonia se introdujeron originalmente a fines de siglo XIX y principios de siglo XX (**Tabla 1.1, Tabla 1.2**) con el propósito de sostener el comercio regional (de productos primarios asociados a la actividad ganadera, agrícola y forestal) y facilitar la movilización de sus habitantes en ausencia accesos viales desarrollados (Lolich 1992; Pica 2005; Bandieri 2019). Sin embargo, a partir de mediados de la década de 1930, las actividades en la región comenzaron a virar gradualmente hacia el turismo (Biedma 1997; Matossian 2012; Bandieri 2019), actividad que hoy en día representa uno de los principales componentes de la economía de Patagonia (PGB Neuquén 2018; PGB Río Negro 2017; PGB Chubut 2019). Esta realineación

económica condujo a la necesidad de reacondicionar mucha de la infraestructura náutica preexistente e incluso introducir nuevos puertos, buques y rutas navegables (p. ej., **Figura 1.2**), con el fin de sostener la masiva afluencia de visitantes y explotar económicamente el transporte recreativo de pasajeros (Matossian 2012; Bandieri 2019). Por su parte, el antiguo transporte de carga quedó limitado a la movilización de suministros a bordo de pequeños buques de servicio hacia destinos principalmente turísticos con acceso terrestre limitado. Actualmente, las actividades náuticas más importantes que se desarrollan en Patagonia involucran excursiones lacustres organizadas, exclusivamente diurnas, a bordo de distintos tipos de *buques de pasajeros* (**sección 1.4.2**), y la realización de actividades recreacionales o deportes acuáticos a bordo de *embarcaciones menores y deportivas* (**sección 1.4.2**).

El transporte naval interno de Patagonia también representa un recurso vital para muchas comunidades rurales que habitan la región. Dada la limitada, o incluso nula, conectividad terrestre que existe en algunos parajes, muchos pobladores dependen exclusivamente del transporte lacustre para movilizarse hacia centros urbanos, abastecerse de suministros básicos, acceder a servicios de salud, comercializar a pequeña escala productos de la actividad ganadera y agricultora, etc. (Anselmi et al. 2012; PNNH 2019; Salgado et al. 2022).

En Argentina, la *Prefectura Naval Argentina* es la fuerza de seguridad con estado policial encargada de la seguridad de todas las vías navegables y costas o playas del país, sean interiores o del Mar Argentino; en la Antártida Argentina, las Islas Malvinas y demás islas del Atlántico Sur; en los puertos sometidos a la jurisdicción nacional; a bordo de buques en aguas jurisdiccionales o de



Figura 1.2. Ejemplo de un típico puerto interior de la Patagonia andina, el Pto. San Martín en el Lago Lácar, Provincia del Neuquén, y de distintas tipologías de buques de pasajeros amarrados o fondeados en sus alrededores. Cortesía de la *Naviera Lácar & Nonthué*.

bandera argentina que se encuentren en el mar libre o en puertos extranjeros; y en zonas de seguridad de frontera marítima (Ley 18.398). La Prefectura Naval Argentina cumple funciones de policía de seguridad de la navegación, de prevención del orden público, de protección ambiental, policía judicial, auxiliar pesquera, aduanera, migratoria y sanitaria (Ley 18.398) bajo la jurisdicción del Ministerio de Seguridad de la Nación (Decreto 66/2017).

A la vez, muchas de las vías navegables de Patagonia andina se encuentran localizadas casi enteramente dentro de reservas naturales. A partir de ello, las actividades náuticas son también reguladas por las correspondientes jurisdicciones de la *Administración de Parques Nacionales de Argentina* a los fines de preservación y mantenimiento del *Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Argentina* (Ley 22.351).

Adicionalmente, la navegación de estos lagos y ríos andino-patagónicos comprende ciertas restricciones específicas de regimentación de seguridad, debido a las condiciones hidro-meteorológicas adversas que suelen imperar en la región (REGINAVE 2019).

1.4.2. Los buques

El *buque* (o *embarcación*) refiere a toda construcción flotante destinada a navegar por el agua (Ley 20.094), exceptuando otras construcciones flotantes auxiliares de la navegación no destinadas específicamente a ella, que se definen como *artefactos navales* (Ley 20.094). Existe una gran variedad de *tipologías* o tipos de buque, los cuales suelen definirse en términos generales según: (1) la zona o el ámbito que navegan; (2) el tipo de tarea u operación que realizan; (3) las métricas de la eslora del buque; u otros aspectos particulares como (4) el número y forma del casco; (5) los medios de propulsión específicos que éste emplee, etc. (p. ej., Rawson & Tupper 2001; Tupper 2004; Molland 2008; Eyres & Bruce 2012; Song & Panayides 2015). En este capítulo, los buques serán referenciados tal como lo establece la Prefectura Naval Argentina a través del correspondiente *Nuevo Régimen para la Navegación Argentina* (REGINAVE 2019) y las respectivas *Ordenanzas Marítimas* modificatorias. Este sistema clasificatorio se encuentra resumido a continuación en la **Tabla 1.1**.

TIPOLOGIA DEL BUQUE (embarcaciones interiores)	ATRIBUTOS DEL BUQUE
Buque de Pasajeros de Primera ¹	Todo buque construido para el transporte de 12 o más pasajeros ⁴ y esloras superiores a los 17 metros de longitud; incluye yates a motor, yates a vela con motor auxiliar ^{2;3} , catamaranes, trimaranes ⁶ , cruceros pequeños.
Buque de Pasajeros de Segunda ¹	Todo buque construido para el transporte de 12 o más pasajeros ⁴ y esloras inferiores a los 17 metros de longitud; incluye yates a motor, yates a vela con motor auxiliar ^{2;3} , catamaranes, trimaranes ⁶ , cruceros pequeños.
Embarcaciones Deportivas y Embarcaciones Menores (motorizadas) ^{2;7}	Embarcaciones con capacidad de transporte inferior a los 12 pasajeros, indiferente al tamaño de eslora; incluye bote motor, botes semirrígidos motor (RIBs), lanchas motor, motoveleros, canoas motor, yates a motor, yates a vela con motor auxiliar ^{2;3} , cruceros pequeños.
Buques de Servicio ^{1;4}	Cualquier tipo de buque o artefacto naval destinado a cumplir servicios especializados aparte del transporte de pasajeros, o complementarios al transporte de pasajeros; incluye barcasas, ferry-barcasas, buques de carga, embarcaciones pesqueras, buques auxiliares de remolque, grúas, embarcaciones de amarre, dragas, balsas a maroma ⁶ .
Embarcaciones (no-motorizadas) ^{2;6}	Incluye veleros, yates de vela ^{2;3} , botes de remo, canoas, kayaks ⁵ , balsas a maroma ⁶ .

Tabla 1.1. Clasificación de embarcaciones interiores según lo establece la Prefectura Naval Argentina (REGINAVE 2019 y Ordenanzas Marítimas modificatorias 02/76¹; 02/79²; 01/18³; 01/16⁴; 03/17⁵; 03/19⁶; <https://www.argentina.gob.ar/prefectura naval/reglamentacion/ordenanzas>).

1.4.3. Los puertos

En Argentina, los puertos son clasificados primordialmente según: (1) su ubicación (diferenciándose entre *puertos marítimos* y *puertos interiores* o *fluvio-lacustres*); y otros aspectos específicos del inmueble como (2) su titularidad (nacional, provincial, municipal, de los particulares); (3) su tipo de uso (público, privado); y (4) su destino principal (comercial, industrial, recreativos en general) (Ley 24.093).

Así, los puertos interiores de Patagonia andina corresponden, prácticamente en su totalidad, a puertos artificiales lacustres de cabotaje nacional, de uso público o privado, destinados exclusivamente al transporte de pasajeros (Ley 24.093).

En la **Tabla 1.2** se enlistan y describen los principales puertos, muelles y marinas de Patagonia donde se relevaron datos de acciones de respuesta a la emergencia (**sección 2**) e impactos por caídas piroclásticas (**sección 3**). Es importante destacar que prácticamente ninguno de estos puertos cuenta con sistemas de balizado, ya que normalmente la navegación nocturna en las vías interiores de Patagonia no está habilitada por regulaciones de seguridad y conservación. Quedan excluidos de la **Tabla 1.2** otros sitios críticos (no portuarios) de Patagonia, como los embalses Amutui-Quimey de la Represa Hidroeléctrica de Futaleufú (Provincia de Chubut), y del Río Limay de la Represa Hidroeléctrica de Alicurá (Provincias del Neuquén y Río Negro), donde también se registraron y relevaron datos de impactos y de respuesta a la emergencia. La ubicación de todos estos sitios puede verse en las **Figuras 1.11, 1.12, 1.13 y 1.14**.

Desde un punto de vista funcional, un sitio portuario puede subdividirse en distintas *zonas* según el tipo de obras, instalaciones y prestaciones que ofrezca (Leitner & Harrison 2001; Branch & Roberts 2014; Song & Panayides 2015; Burns 2018).

De esta manera pueden distinguirse al menos tres *dominios* diferentes: (1) una *zona marítima*, o *sea-side domain*, donde se brindan servicios destinados principalmente al buque (fondeo, atraque, desatraque y permanencia), que incluye obras de abrigo al oleaje exterior (p. ej., diques, diques de encausamiento, rompeolas), infraestructura y dispositivos para la señalización (p. ej., faros, boyas), canales dragados, espacios de fondeo o radas, dársenas, etc.; (2) una *zona terrestre* o *land-side domain*, destinada principalmente al manejo de cargas y pasajeros (embarco y desembarco), que incluye las superficies de operación terrestre como los muelles y maquinarias, equipamiento e infraestructuras asociadas; y (3) una *zona de evacuación* o *evacuation domain*, destinada principalmente al trasbordo de cargas y pasajeros y vincule con otras redes de transporte integradas.

Esta clasificación de dominios permitió realizar una diferenciación respecto a la exposición a distintos tipos de peligros volcánicos y una mejor sistematización de los impactos en el ámbito portuario (**sección 3.4**).

LAGO	PUERTO O SITIO	UBICACIÓN	CARACTERÍSTICAS GENERALES	ACCESO	INFRAESTRUCTURA, MATERIALES & DIMENSIONES	CAPACIDAD
Lagos Futralaufquen & Krüger	Puerto Bustillo	42° 16' 05" S 72° 12' 20" W	Construido por PN en 1937 para el comercio de madera. Destruído en un evento de inundación en 1970, pero prontamente reconstruido para el amarre de buques. Reacondicionado en 2003 para el resguardo de guardacostas y buques turísticos (que operan desde Pto. Limonao) por falta de fondeaderos en la región	Un único camino de ripio desde Villa Futralaufquen	Base de amarre de hormigón armado (30 x 15 m) e iluminación interna, con columnas y techo a dos aguas de madera. Profundidad promedio de 3 m	Buques con eslora <30 m
	Puerto Limonao	42° 51' 50" S 71° 37' 25" W	Construido por PN en 1937 para el comercio de madera. Destruído en un evento de inundación en 1970, pero prontamente reconstruido en 1975 para fines turísticos. Actualmente sirve como punto de partida para paseos en redondo hacia Mlle. Krüger y Pto. Mermoud	Un único camino de ripio desde Villa Futralaufquen	Muelle de madera en "L" (30 x 10 m) con primer tramo de acceso techado con iluminación interna. Profundidad promedio de 3 m	Buques con eslora <30 m
	Muelle Krüger	42° 53' 26" S 71° 43' 49" W	Construido por PN en 1937 para el comercio de madera. Actualmente sirve como destino turístico de paseos en redondo que zarpan desde Pto. Limonao	Lacustre desde Pto. Limonao (o 12 km de sendero a pie)	Pequeño muelle de madera en "I"	Buques con eslora <30 m
Lago Verde	Puerto Mermoud	42° 43' 23" S 71° 44' 54" W	Construido por PN en 1940 para turismo. Actualmente sirve como destino turístico de paseos en redondo que zarpan desde Pto. Limonao	A pie desde la RP 71 por un único sendero de 1 km	Muelle de madera en "I" (30 m)	Buques con eslora <30 m
Lago Menéndez	Puerto Chucao	42° 34' 53" S 71° 35' 41" W	Construido por PN en 1940 para turismo. Destruído por un incendio en 1999 (junto a la embarcación <i>Arcoiris</i>), pero prontamente reconstruido próximo a las ruinas. Actualmente sirve como puerto de asiento para paseos en redondo hacia Mlle. Sagrario y Mlle. Nuevo	A pie desde la RP 71 por un único sendero de 2 km	Muelle de madera en "T" (30 m) con iluminación interna. Profundidad promedio de 3 m	Buques con eslora <25 m
	Muelle Sagrario	42° 45' 13" S 71° 45' 64" W	Construido por PN en 1940 para turismo. Actualmente sirve como destino turístico de paseos en redondo que zarpan desde Pto. Chucao	Lacustre desde Pto. Chucao	Muelle de madera en "I" (25 m). Profundidad promedio de 3 m	Buques con eslora <25 m
	Muelle Nuevo	42° 40' 14" S 71° 53' 01" W	Construido por PN en 1940 para turismo. Actualmente sirve como destino turístico de paseos en redondo que zarpan desde Pto. Chucao	Lacustre desde Pto. Chucao	Pequeño muelle de madera en "I"	Embarcaciones Menores y Deportivas
Lago Nahuel Huapi (sur)	Puerto San Carlos	41° 07' 55" S 71° 18' 30" W BRC	Construido en 1935 para el comercio (Chile) de madera y lana. Afectado por un incendio en 1958 y destruido en 1960 tras el <i>Sismo de Valdivia</i> . Reconstruido en 1991 para turismo regional e internacional con Chile. Actualmente inoperativo para el transporte de pasajeros; sirve de base para PNA; infraestructura destinada para actividades comerciales, culturales y turísticas	Acceso fácil por cualquier tipo de vehículo	Dos dársenas principales de concreto (112 y 108 m respectivamente) dentro de un rompeolas de concreto en "L" habilitado para el tránsito peatonal	Buques con eslora <30 m
	Club Náutico Bariloche	41° 07' 43" S 71° 20' 51" W	Asociación civil con estatus legal, dedicada específicamente a la práctica de actividades náuticas deportivas y recreativas. Fundado en 1947 en Pto. San Carlos, y luego desplazado a su ubicación actual en 1964 tras la destrucción del puerto en 1960	Acceso fácil por cualquier tipo de vehículo	Amarradero y marina seca con múltiples muelles (concreto, madera, flotantes) dentro de un rompeolas de material en "I" (200 m). Ofrece numerosos servicios náuticos y recreativos	Cientos de Embarcaciones Menores y Deportivas con eslora <45 m
	Puerto Pañuelo	41° 03' 07" S 71° 31' 50" W	Construido en 1965 dentro de una bahía natural para el turismo regional e internacional con Chile, luego de la destrucción de Pto San Carlos. Reacondicionado en 1985 como una única dársena de concreto con numerosos muelles menores. Actualmente sirve como puerto de asiento para paseos en redondo a numerosos destinos y como base para PNA	Acceso fácil por cualquier tipo de vehículo	Dársena principal de concreto y siete muelles anexos de madera o concreto en "I" y "T" (entre 14 y 35 m de longitud). Profundidad promedio entre 5 y 8 m. Ofrece numerosos servicios recreativos. Sirve anualmente >350.000 pasajeros	Buques con eslora <50 m
	Puerto Blest	41° 01' 27" S 71° 48' 49" W Brazo Blest	Construido (junto al Hotel Puerto Blest) en 1937 en el camino al Paso Internacional Pérez Rosales, para el comercio y transporte de pasajeros a Chile. Reconstruido y reacondicionado en 2012 para turismo. Sirve como base para PNA	Lacustre desde Pto. Pañuelo	Dos muelles de madera y hierro en "I" y "T" (~ 25 m cada uno). Profundidad promedio <4 m	Buques con eslora <30 m
	Muelle Cántaros	41° 01' 04" S 71° 49' 15" W Brazo Blest	Construido en 1958 exclusivamente para turismo. Actualmente sirve como destino turístico de paseos en redondo que zarpan desde Pto. Pañuelo	Lacustre desde Pto. Pañuelo	Muelle de madera en "L" (40 x 30 m). Profundidad promedio <4 m.	Buques con eslora <30 m

Tabla 1.2 (parte 1). Caracterización de los sitios portuarios más importantes de la región donde se relevaron impactos de ceniza volcánica y distintas acciones de respuesta a la emergencia. BRC: San Carlos de Bariloche; VLA: Villa La Angostura; SMA: San Martín de los Andes; PN: Parques Nacionales; PNA: Prefectura Naval Argentina; RP: Ruta Provincial; RN: Ruta Nacional.

LAGO	PUERTO O SITIO	UBICACIÓN	CARACTERÍSTICAS GENERALES	ACCESO	INFRAESTRUCTURA, MATERIALES & DIMENSIONES	CAPACIDAD
Lago Nahuel Huapi (noroeste)	Puerto Modesta Victoria	40° 46' 58" S 71° 39' 26" W VLA	Muelle privado construido por el municipio local a principios de la década de 1940 en <i>Bahía Mansa</i> para la conexión lacustre de VLA con BRC. Reacondicionado en 1972. Reconstruido en su totalidad en 2001 para turismo. Actualmente administrado por PN, sirve como puerto de asiento para paseos en redondo hacia Pto. Quettrihué y como base para PNA	Acceso fácil por cualquier tipo de vehículo	Muelle de madera en "T" (55 x 4 m) con doble plataforma y techado en su parte más distal. Profundidad promedio entre 6 y 10 m	Buques con eslora <50 m
	Muelle La Flecha	40° 46' 57" S 71° 39' 39" W VLA	Muelle privado construido por PN a mediados de la década de 1970 en <i>Bahía Brava</i> y luego ampliado y reacondicionado para turismo. Actualmente propiedad de PN (concesionado a privados), sirve como puerto de asiento para paseos en redondo hacia Pto. Quettrihué.	Acceso fácil por cualquier tipo de vehículo	Muelle de madera en "I" (110 x 2,7 m). Profundidad promedio entre 2,5 y 6 m	Buques con eslora <50 m
	Bahía Manzano	40° 47' 58" S 71° 35' 50" W	Bahía y fondeadero natural que aloja numerosos muelles, marinas y clubes náuticos y deportivos. El Pto. Bahía Manzano (el principal) fue construido en 1907 para servicio de vapores. Reacondicionado en 1955 para turismo. Actualmente propiedad de PN (concesionado a privados), sirve para turismo, pesca deportiva, alquiler de amarras	Acceso fácil para vehículos pequeños	Múltiples embarcaderos y muelles de madera. El Pto. Bahía Manzano (el principal) muelle de madera en "U" (55 x 3 m) techado en su parte más distal	Fondeo y amarre para cientos de Embarcaciones Menores y Deportivas
	Puerto Quettrihué	40° 51' 27" S 71° 36' 52" W Península de Quettrihué	Construido por PN en 1942 para turismo (visita al <i>Bosque de Arrayanes</i>). Años después se construye un nuevo muelle en paralelo e infraestructura para turismo. Luego reacondicionado por privados. Actualmente propiedad de PN (concesionado a privados), sirve como destino turístico de paseos en redondo que zarpan desde VLA o BRC	Lacustre (o 12 km de sendero a pie)	Muelle de madera en "I" (80 x 6 m) techado en el acceso. Profundidad promedio entre 7 y 8 m	Buques con eslora <30 m
	Puerto Anchorena	40° 58' 15" S 71° 31' 23" W Isla Victoria	Construido por PN en 1974 exclusivamente para turismo (visita a la <i>Isla Victoria</i>) dentro de una bahía natural, con acceso por canal. Actualmente propiedad de PN, sirve como destino turístico de paseos en redondo que zarpan desde VLA o BRC	Lacustre	Muelle de madera en "U" (50 m) con doble plataforma en partes y techado en su tramo de acceso. Profundidad promedio <4 m	Buques con eslora <40 m
Lago Traful	Puerto Traful	40° 39' 13" S 71° 23' 58" W Villa Traful	Marina relativamente nueva más sofisticada, construida adyacente al antiguo muelle de Traful	Por la RP 65, un único camino de ripio	Dos muelles de madera en "I" y "T" (60 y 70 m de longitud respectivamente) formando un pequeño embarcadero	Embarcaciones Menores y Deportivas
Lagos Lácar & Nonhué	Puerto Lácar o San Martín	40° 09' 42" S 71° 21' 31" W SMA	Construido por PN en 1937 para el comercio de madera y el transporte de vehículos a Puerto Hua Hum. Reconstruido en su totalidad en 1998 para turismo. Actualmente propiedad de PN, sirve como puerto de asiento para paseos en redondo a distintos destinos.	Acceso fácil por cualquier tipo de vehículo	Muelle de madera en "P" (60 x 18 m) techado en su parte más distal. Profundidad promedio ~3 m	Buques con eslora <30 m
	Puerto Don Bruno	40° 10' 27" S 71° 26' 02" W Quila Quina	Construido por PN en 1937 en el paraje Quila Quina. Reconstruido en su totalidad en 1999. Actualmente propiedad de PN, sirve como destino turístico de paseos en redondo que zarpan desde Pto. Lácar	Por la RN 108, un único camino de ripio	Muelle de madera en "I" (40 m). Profundidad promedio ~3 m. Balizado con luz de destellos para la navegación nocturna	Buques con eslora <30 m
	Puerto Hua Hum	40° 07' 19" S 71° 39' 14" W	Construido por PN en 1937 en el camino al Paso Internacional Hua Hum (Chile) para el comercio de madera y el transporte de vehículos desde Pto. Lácar. Reacondicionado en 2003 para turismo. Actualmente propiedad de PN, sirve como destino turístico de paseos en redondo que zarpan desde Pto. Lácar	Por la RP 48, un único camino de ripio	Muelle de madera y hormigón en "L" (60 x 25 m)	Buques con eslora <30 m
	Puerto Chachín	40° 08' 34" S 71° 39' 07" W	Construido próximo a la desembocadura del Río Chachín. Actualmente en desuso por deterioro	Un único camino de ripio	Muelle de madera en "I" (30 m)	Buques con eslora <30 m
Lagos Huechulafquen & Epulafquen	Puerto Canoa	39° 45' 10" S 71° 30' 05" W	Construido después de 1937 en la orilla norte del Lago Huechulafquen para el transporte de carga hacia Pto. Encuentro (Lago Epulafquen). Reconstruido en 1992 para turismo. Actualmente propiedad de PN, sirve como puerto de asiento para paseos en redondo hacia Pto. Encuentro	Por la RP 61, un único camino de ripio desde Junín de los Andes	Muelle de madera reforzada en "L" (30 x 12 m). Profundidad promedio ~5 m	Buques con eslora ~15 m

Tabla 1.2 (parte 2). Caracterización de los sitios portuarios más importantes de la región donde se relevaron impactos de ceniza volcánica y distintas acciones de respuesta a la emergencia. BRC: *San Carlos de Bariloche*; VLA: *Villa La Angostura*; SMA: *San Martín de los Andes*; PN: *Parques Nacionales*; PNA: *Prefectura Naval Argentina*; RP: *Ruta Provincial*; RN: *Ruta Nacional*.

1.5. Sobre el riesgo volcánico & el área de estudio

1.5.1. El volcanismo andino activo

En su sentido amplio, se entiende por *volcán activo* a aquellos centros que, habiéndose originado a partir del Pleistoceno medio o tardío, registran evidencias de actividad durante el Holoceno o los últimos ~10.000 años.

A lo largo de la cordillera de los Andes el volcanismo activo no es continuo, sino que ocurre en cuatro grandes segmentos de arco, separados por espacios sin evidencia de actividad volcánica reciente (**Figura 1.3**). Estos cuatro segmentos corresponden a los denominados Zona Volcánica Norte, Central, Sur y Austral, los cuales pueden a su vez subdividirse en subsegmentos de arco más pequeños (Stern 2004; entre otros). La Zona Volcánica Sur (ZVS) se extiende entre los 33° S y los 46° S y está limitada por el *Flat-Slab Pampeano* (27° S - 33° S) hacia el norte y el *Gap Volcánico Patagónico* (46° S - 49° S) hacia el sur (Ramos et al. 2009).

En esta zona, el volcanismo cuaternario puede a su vez subdividirse en cuatro provincias correspondientes a la ZVS norte (33° S - 34.5° S), la ZVS transicional (34.5° S - 37° S), la ZVS central (37° S - 41.5° S) y la ZVS sur (41.5° S - 46° S) (Stern 2004; **Figura 1.4**).



Figura 1.3. Mapa esquemático de los segmentos de arco en los que se divide el volcanismo activo en Sudamérica. Adaptado de Ramos et al. (2009).

El área de estudio, la *Patagonia norte*, es un territorio definido arbitrariamente entre los 37° S y los 46° S y se extiende justamente a sotavento de los dos subsegmentos más australes de la ZVS (central y sur; 37° S - 46° S). Aquí, la ubicación de muchos de los estratovolcanes del arco cuaternario, y la de varios centros monogenéticos holocenos, está controlada por el *Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui*, un sistema transcurrente dextral de edad neógena a cuaternaria que se extiende unos 1.000 km en dirección nor-noreste (Cembrano et al. 1996). La composición predominante de las rocas en este frente corresponde a la de los basaltos toleíticos de alta alúmina y andesitas basálticas (Hickey-Vargas et al. 1989; Futa & Stern 1988; Stern 2004), aunque también pueden hallarse algunas composiciones más evolucionadas como andesitas, dacitas y riolitas (Gerlach et al. 1988; Stern 2004).

El catálogo *Volcanoes of the World* (GVP 2013) contabiliza un total de 63 volcanes *activos* para toda la ZVS (incluyendo aquellos con evidencias de erupciones inciertas) y entre estos, unos 43 volcanes para los subsegmentos central y sur específicamente. Corbella & Lara (2008) en cambio, contabilizan unos 46 centros activos para los mismos subsegmentos.

Algunos de estos volcanes han producido erupciones de forma más reciente durante *tiempos históricos*, un periodo de tiempo que prosigue a la conquista española de la región (Corbella & Lara 2008) y que iniciaría con la erupción del volcán Villarrica de 1558 (Clavero & Roa 2004). *Volcanoes of the World* contabiliza para la cordillera patagónica norte unos 19 o 20 volcanes activos, u holocenos, con erupciones ocurridas en tiempos históricos (GVP 2013). De norte a sur, estos corresponden a los volcanes Tromen ($37,14^{\circ}$ S - $70,03^{\circ}$ O; Argentina); Antuco ($37,40^{\circ}$ S - $71,35^{\circ}$ O; Chile); Copahue ($37,85^{\circ}$ S - $71,18^{\circ}$ O; Argentina-Chile); Callaqui ($37,92^{\circ}$ S - $71,45^{\circ}$ O; Chile); Lonquimay ($38,37^{\circ}$ S - $71,58^{\circ}$ O; Chile); Llaima ($38,69^{\circ}$ S - $71,73^{\circ}$ O; Chile); Villarrica ($39,42^{\circ}$ S - $71,93^{\circ}$ O; Chile); Quetrupillán ($39,49^{\circ}$ S - $71,72^{\circ}$ O; Chile); Lanín ($39,63^{\circ}$ S - $71,50^{\circ}$ O; Argentina-Chile); el Grupo Huanquihue ($39,88^{\circ}$ S - $71,58^{\circ}$ O; Argentina); el Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco

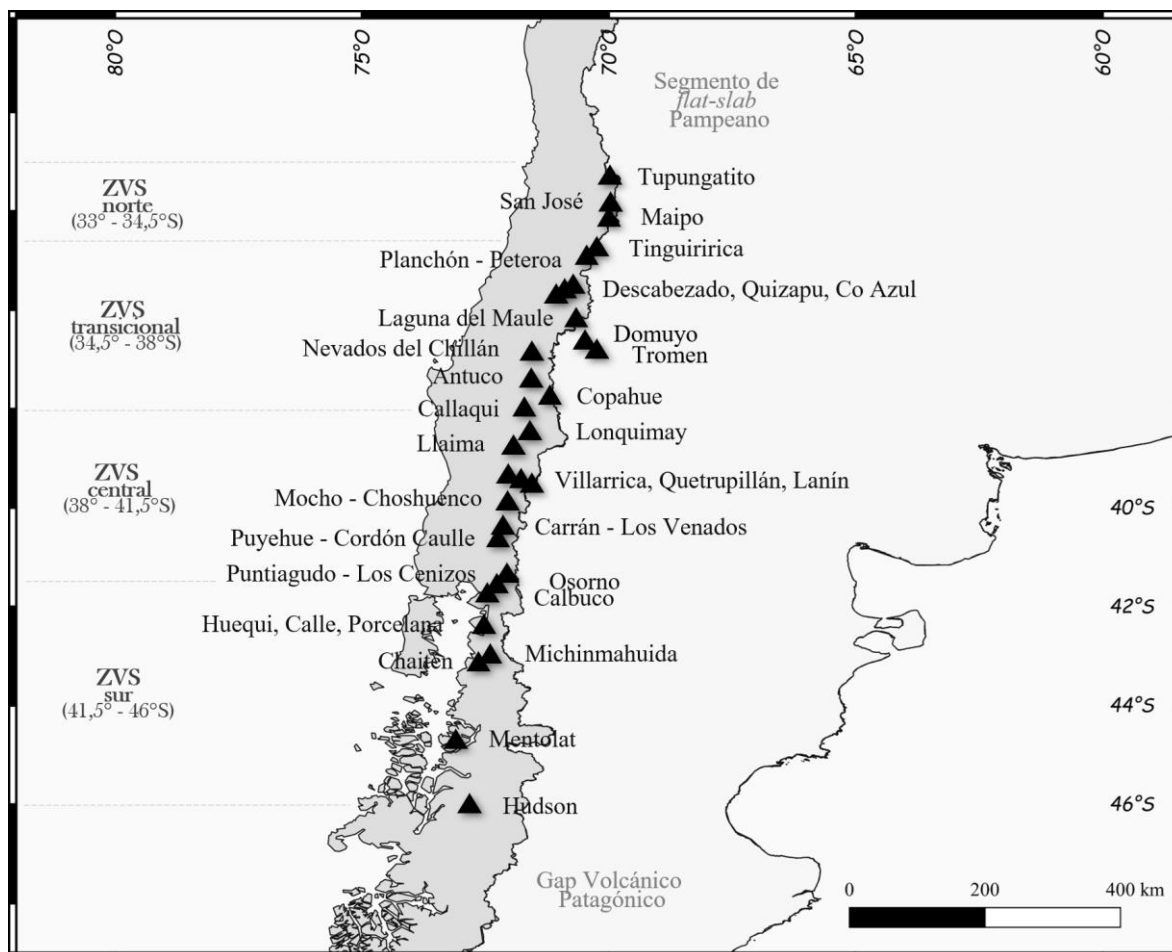


Figura 1.4. Mapa esquemático de los cuatro subsegmentos en los que se subdivide el volcanismo cuaternario de la Zona Volcánica Sur de los Andes y ubicación de los principales centros volcánicos con actividad histórica registrada. Adaptado de Stern (2004).

(39,92° S - 72,02° O; Chile); el Grupo Carrán-Los Venados (40,35° S - 72,07° O; Chile); el Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (40,50° S - 72,20° O; Chile; **sección 1.6.3**); Puntagüedo (40,96° S - 72,26° O; Chile); Osorno (41,10° S - 72,49° O; Chile); y Calbuco (41,33° S - 72,61° O; Chile; **sección 1.6.4**) en la ZVS central. Y los volcanes Complejo Volcánico Huequi-Calle-Porcelana (42,37° S - 72,57° O; Chile); Michinmahuida (42,79° S - 72,44° O; Chile); Chaitén (42,83° S - 72,65° O; Chile; **sección 1.6.2**); Mentolat (44,70° S - 73,08° O; Chile); y Hudson (45,90° S - 72,97° O; Chile; **sección 1.6.1**) en la ZVS sur.

1.5.2. El flujo regional de vientos del oeste

En latitudes extra tropicales (35° S - 55° S) la circulación atmosférica está dominada, en niveles superiores e inferiores, por el flujo regional de vientos del oeste, o *westerlies* (Nakamura & Shimpo 2004; Garreaud 2009; Viale et al. 2019; **Figura 1.5**). Es por esto que Patagonia argentina se ve afectada de forma recurrente por las caídas de los materiales piroclásticos que se producen por

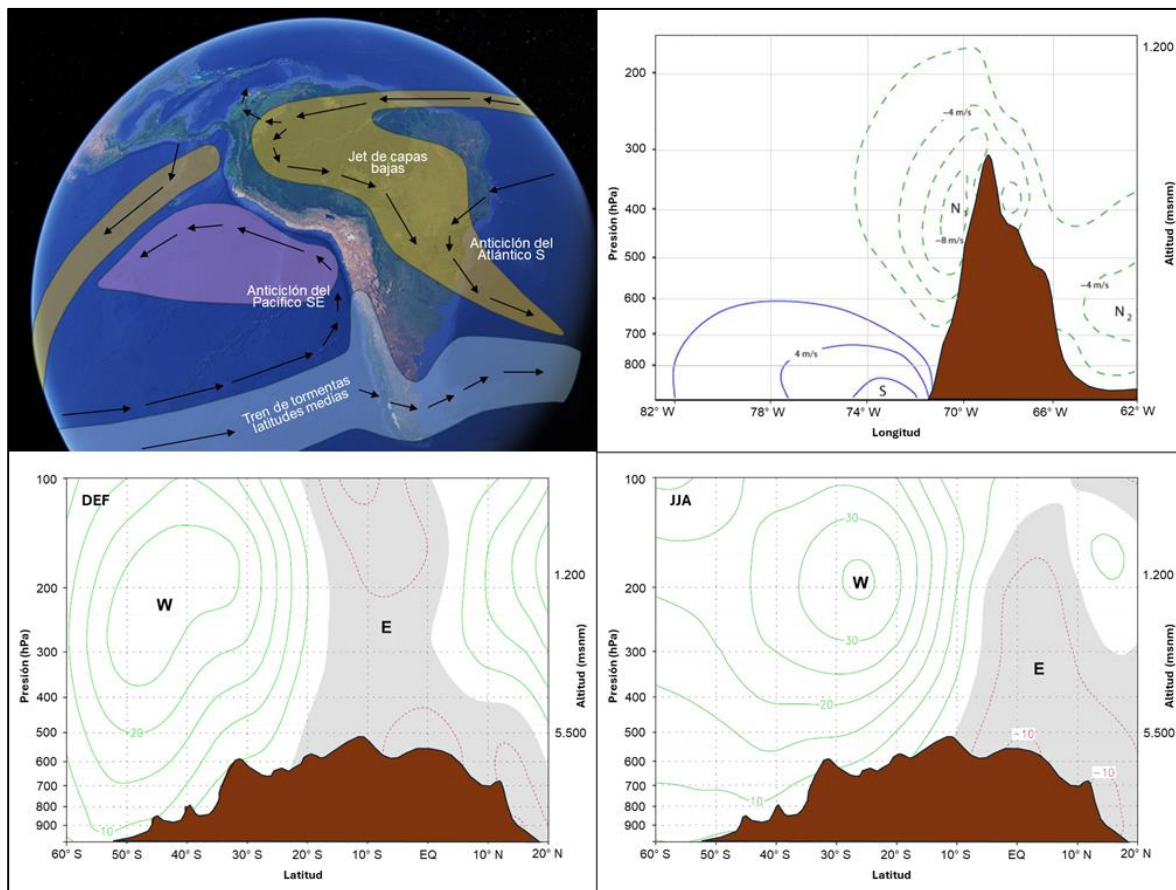


Figura 1.5. Caracterización de la circulación atmosférica de Sudamérica. Arriba a la izquierda, esquema del flujo de capas bajas (<1.5 km) y campos de precipitaciones (naranja: tormentas tropicales; morado: formación de estratocúmulos; celeste: precipitaciones de latitudes medias). Arriba a la derecha, gráfico de vientos meridionales medios en capas altas de la atmósfera a los 27° S para los meses de primavera. Abajo, vientos zonales medios en capas altas de la atmósfera entre los 80° y 60° W para meses de verano e invierno. Reanálisis NCEP-NCAR (Kalnay et al. 1996).

las erupciones explosivas de los volcanes andinos y que se dispersan hacia el este a causa de este flujo (Villarosa et al. 2006).

En capas altas, el *jet del oeste* se debilita y desplaza hacia el sur en los meses de verano; mientras que en invierno se intensifica y se mueve hacia el ecuador, alcanzando su máxima fuerza cerca de los 30° S (Garreaud 2009).

En capas bajas, por debajo de los ~1.5 km, el flujo de vientos es más complejo, debido a la influencia del continente y el orógeno andino. Sin embargo, al sur de los 35° S, la influencia del sistema de baja presión en el centro sudamericano disminuye su intensidad, permitiendo que los vientos del oeste prevalezcan durante todo el año, siendo más fuertes entre 45° S y 55° S (Seluchi et al. 2003).

Al sur de los 35° S los vientos de capas bajas, que transportan la mayor parte del vapor de agua, atraviesan un orógeno particularmente estrecho (<150 km) y bajo (~1.500 msnm), perdiendo humedad en el lado barlovento y creando hacia el este uno de los gradientes de precipitación más extremos del mundo (Garreaud et al. 2013; Bianchi et al. 2016; Viale et al. 2018).

1.5.3. El peligro de las caídas piroclásticas

Las erupciones volcánicas pueden generar una amplia variedad de fenómenos con el potencial de causar algún tipo de daño o perturbación en distintos sectores de la sociedad o el ambiente (Wilson et al. 2014a). Pero entre todos estos, las *caídas de ceniza volcánica* (*s. ampl.*) o *caídas piroclásticas* (*s. estr.*) resultan ser el peligro que ocurre con mayor frecuencia (Newhall & Hoblitt 2002) y potencial de dispersión (Dingwell et al. 2012). Por esto, las caídas de ceniza volcánica suelen ser eventos extremadamente disruptivos, con capacidad de generar daños muy extensos y perdurables en el tiempo sobre muchos sectores de la sociedad, incluyendo particularmente a los sistemas de transporte naval.

Tefra o ceniza volcánica

Tefra, del griego τέφρα que significa *ceniza* (Thorarinsson 1944), es un término genérico que hace referencia a todos los productos piroclásticos no consolidados que se generan durante una erupción volcánica explosiva, sin ningún tipo de alusión al tamaño, origen o composición de los materiales (Lowe 2011). Típicamente, las tefras comprenden fragmentos de vidrio volcánico, fragmentos de minerales y fragmentos de roca (Lowe 2011; White & Houghton 2006; Stevenson et al. 2012). El término *ceniza* (*s. estr.*) en cambio implica connotaciones granulométricas y se utiliza para describir fragmentos piroclásticos de entre 2 mm y 0.0625 mm de tamaño (Teruggi 1982). Sin embargo, en muchas disciplinas o áreas ajenas a la volcanología física el término *ceniza* (*s. ampl.*) es utilizado coloquialmente como sinónimo de *tefra*, especialmente para los materiales transportados en la atmósfera.

Caídas de ceniza volcánica

La ceniza volcánica se genera a partir de distintos mecanismos que ocurren durante una erupción volcánica explosiva (**Figura 1.6**) y que incluyen: (1) la vesiculación y fragmentación del

magma, en caso de las erupciones magmáticas (Cashman et al. 2000); (2) el enfriamiento y fragmentación explosiva del magma por interacción con el agua y/o el hielo, en el caso de las erupciones hidromagmáticas (Morrissey et al. 2000); y (3) la fragmentación de roca de caja, sin participación de material juvenil, en el caso de erupciones freáticas (Macedonio et al. 1994).

Al ser inyectados en la atmósfera, estos fragmentos pueden ser empujados a grandes alturas, formando *columnas eruptivas* que pueden alcanzar hasta los 50 km de altura (Sparks 1986). En su parte más basal, en la *zona de jet*, las columnas ascienden por el momento inicial vertical que genera la descompresión y expansión de los gases volcánicos; en cambio, en la *zona convectiva* superior, la columna asciende por flotabilidad positiva, relacionada con la temperatura de los gases en la columna y favorecida por la incorporación de aire de la atmósfera circundante a la columna (Bonadonna et al. 2015b). Este ascenso está condicionado por el efecto que ejercen varios factores atmosféricos sobre la columna o pluma eruptiva (Carey & Bursik 2015).

Si la columna eruptiva se eleva lo suficiente puede superar el *nivel de flotabilidad neutra* y equiparar su densidad con la de la atmósfera circundante, formando una *zona de paraguas*, a partir de donde las emisiones volcánicas se expanden lateralmente por mecanismos de difusión y advección (Sparks et al. 1997). A partir de aquí, el transporte y la caída de la ceniza volcánica estarán regidos por mecanismos complejos de sedimentación de partículas gruesas y finas (p. ej., Houghton et al. 2000; Romero et al. 2015; Bonadonna et al. 2015b; **Figura 1.6**). Además, la agregación de ceniza volcánica también influye en el transporte y las características del depósito de caída piroclástica (Brown et al. 2012). Como regla general, tanto el espesor como el tamaño de grano de las partículas del depósito disminuyen de manera exponencial con la distancia al foco eruptivo (Bonadonna et al. 2015b; Houghton & Carey 2015; Becket et al. 2022).

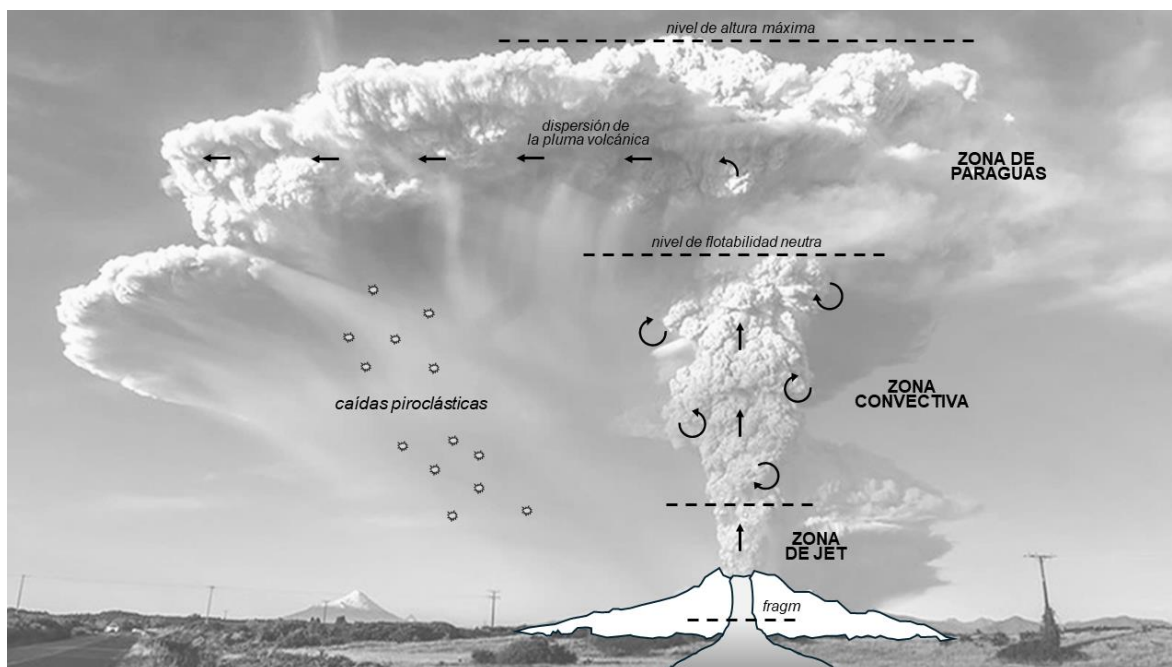


Figura 1.6. Diagrama esquemático de generación, dispersión y caída de fragmentos piroclásticos. De fondo, el volcán Osorno y la erupción del Calbuco de abril de 2015 (Andiseño Estudio, CC.).

Características (de peligrosidad) de la ceniza volcánica

Esta diversidad de orígenes y composiciones le confiere a la ceniza volcánica una variedad de propiedades físicas y químicas (Houghton et al. 2000) con capacidad de generar distintos tipos de daño (Wilson et al. 2012a; Wilson et al. 2014a).

Entre todas las características de peligrosidad, la carga estática vertical que genera la acumulación del material piroclástico es usualmente el causante de la mayor cantidad y severidad de impactos por caída de ceniza volcánica (Blong 1984; Neild et al. 1998; Wilson et al. 2012a; Wilson et al. 2014a; Jenkins et al. 2015; **Figura 1.7**). Para un determinado depósito, la carga vertical estará definida por: (1) la densidad de los materiales constituyentes, la cual puede variar desde unos 700 kg/m³ como promedio mínimo para fragmentos pumíceos, hasta más de 3300 kg/m³ para algunos fragmentos minerales máficos (Schön 2011; Jenkins et al. 2015); (2) la porosidad total del depósito, asociada al empaquetamiento entre los granos y la vesicularidad de los materiales juveniles (Estrada 2016; Landauer et al. 2020); y (3) la cantidad de agua que pueda alojarse en estos espacios vacíos (Williams et al. 2021; Osman et al. 2022). Este último factor puede incrementar la carga vertical en hasta un 100% respecto al depósito seco (Macedonio & Costa 2012).

Los fragmentos de ceniza volcánica, y sobre todo los fragmentos juveniles originados a partir de erupciones magmáticas, presentan un alto potencial abrasivo (Schön 2011; Jenkins et al. 2015). Esto es porque las partículas vítreas suelen presentar un alto grado de vesicularidad, originada por



Figura 1.7. Ejemplo de colapsos de techos debido a la carga estática vertical generada por el depósito de caída de tefra de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012. Arriba a la izquierda, en los alrededores de Villa La Angostura. Abajo y a la derecha, en los alrededores del Paso Internacional Cardenal Samoré.

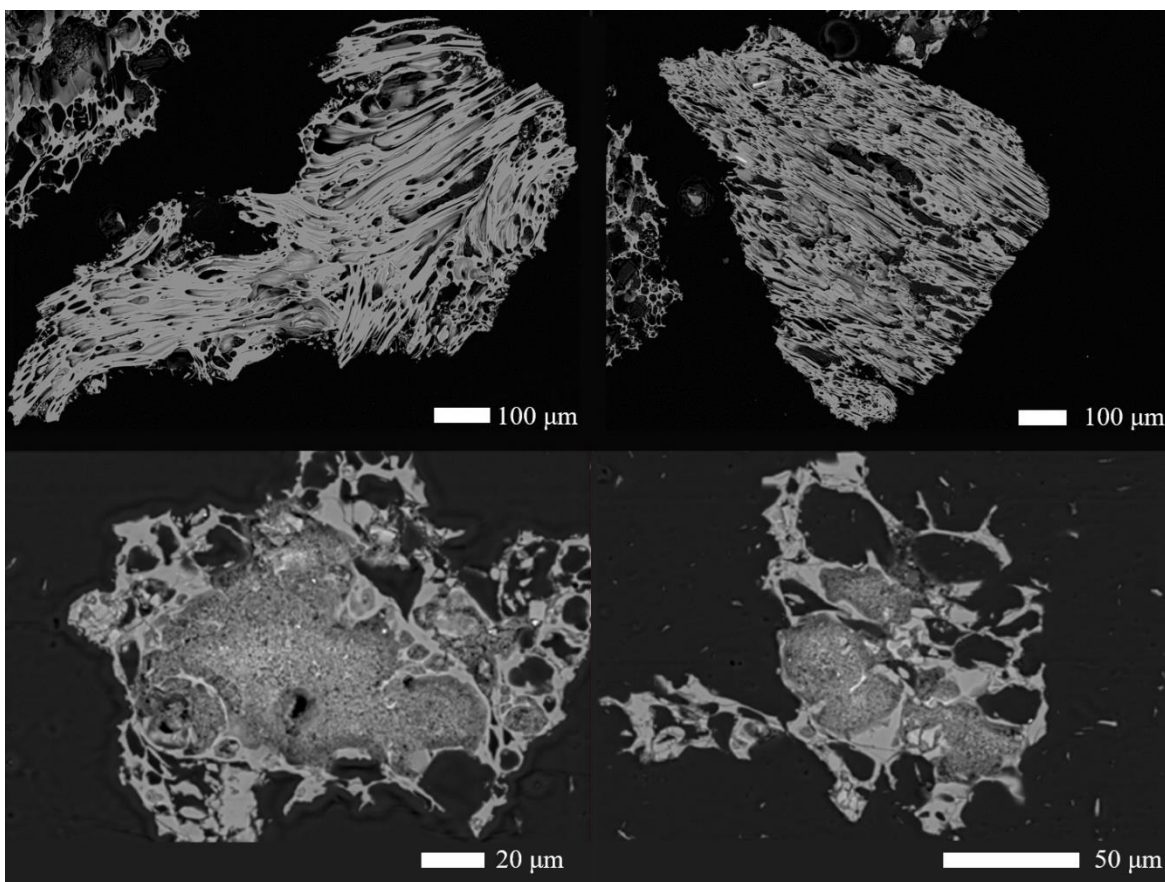


Figura 1.8. Imagen de detalle de microscopía de barrido electrónico (SEM) de fragmentos pumíceos vesiculados de caída primaria, generados por las erupciones del Cordón Caulle de 2011-2012 (arriba) y Calbuco de 2015 (abajo).

la expansión de gases magmáticos antes de que el magma circundante se solidificara (**Figura 1.8**). El potencial abrasivo es una función directa de la morfología del material y su dureza, y le confiere a la ceniza volcánica la capacidad causar daños por erosión y desgaste de distintos tipos de materiales (Heiken & Wohletz 1985).

Una de las características más particulares de la ceniza volcánica es su capacidad para condensar o adsorber en su superficie una variedad de elementos lixiviables presentes en la pluma eruptiva o en la atmósfera circundante, los cuales son emitidos mayormente como gases o elementos metálicos volátiles durante la erupción (p. ej., Delmelle et al. 2007). En su revisión de casos de estudio, Witham et al. (2005) identificaron más de 55 especies de componentes solubles en lixiviados de depósitos de ceniza volcánica.

Entre estos, los más comunes son el sulfuro (S^{-2}), sulfato (SO_4^{-2}), cloruro (Cl^{-}) y fluoruro (F^{-}), los cuales provienen principalmente de la emisión de los gases magmáticos dióxido de azufre (SO_2), cloruro de hidrógeno (HCl) y fluoruro de hidrógeno (HF) (Delmelle et al. 2000; Ayris & Delmelle 2012). Las especies metálicas, en cambio, ocurren en concentraciones minoritarias o traza (Cimino et al. 1998; Allard et al. 2000; Armienta et al. 2002; **Tabla 1.3**).

ELEMENTOS MAYORIT.	CONCENTRACIÓN (mg/kg)				Nro. CASOS
	Máxima	Mínima	Media	Mediana	
Cl	11160	5	1189	1162	30
S	17770	<1	1711	1662	30
F	3140	<1	135	129	29
Na	2560	<1	407	378	28
Ca	23590	<1	2172	2140	27
Mg	4240	<1	349	335	27
K	788	<1	76	71	26
Al	1164	<1	63	58	24
Fe	606	<1	24	21	24
Si	390	<1	27	25	24
Mn	144	<1	22	20	22
P	724	<1	74	74	12
N	280	<1	10	5	11

Tabla 1.3. Concentración de elementos mayoritarios (elementos con concentraciones medias superiores a los 5 mg/kg) y minoritarios (elementos con concentraciones medias por debajo de los 5.000 µg/kg) lixiviables de depósitos de caída de tefra, de casos registrados hasta el año 2010 (modificado de Ayris & Delmelle 2012).

ELEMENTOS MINORIT.	CONCENTRACIÓN (µg/kg)				Nro. CASOS
	Máxima	Mínima	Media	Mediana	
Cu	95	<1	6	5	22
Zn	53020	<100	4013	3575	21
Co	1297	<10	204	186	16
Pb	2072	<50	139	114	16
Cd	337	<4	57	53	15
Ba	6700	<100	942	943	14
Li	1880	<1	270	220	14
Ni	3900	<100	516	499	14
Se	550	<25	59	55	14
Sr	35048	375	4634	4296	14
V	300	<100	91	89	14
As	9325	<100	161	131	13
Cr	520	<50	100	96	13
Br	13593	<5	2050	1931	12
Mo	620	<40	69	63	12
Ti	18668	<1	2317	2317	12
Bi	150	<5	14	15	11
Hg	9	<1	0	0	11
Sn	119	8	79	79	11
B	7722	4	2688	2606	9
U	12	<1	2	2	9
Sb	70	<10	24	24	7
Tl	120	<1	6	4	7

Una vez depositada la ceniza volcánica, estos elementos adsorbidos pueden lixivarse por efecto del agua y dispersarse en el ambiente donde ocurra la caída y acumulación del material piroclástico.

De esta manera, los depósitos de caída primaria pueden ser potencialmente: (1) tóxicos para la vegetación, los animales y las personas (principalmente, por la presencia de fluoruro; Cronin et al. 2003; Witham et al. 2005; Stewart et al. 2006); (2) acidulantes (por la presencia de compuestos ácidos fuertes; Witham et al. 2005) corrosivos (Wilson et al. 2009b; Barnard 2009; Wilson et al. 2012b; **Figura 1.9**); y (3) conductivos en húmedo (Wardman et al. 2012a; 2012b; **Figura 1.10**).



Figura 1.9. Ejemplo de los efectos corrosivos causados por la ceniza volcánica sobre las bombas impulsoras utilizadas en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Bariloche, luego de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012. Cortesía de C. Stewart.



Figura 1.10. Ejemplo de fallos en los aisladores utilizados en los sistemas de distribución de energía eléctrica, a causa del efecto conductivo de la ceniza volcánica en húmedo. Fuente: video capturado por G. Villarosa frente al Centro Regional Universitario de Bariloche, durante la caída de ceniza volcánica del Cordón Caulle de 2011.

En el largo plazo, la liberación de compuestos al medio también puede ocurrir por la meteorización de los fragmentos de ceniza volcánica (Delmelle et al. 2000; Oelkers & Gislason 2001; Gislason & Oelkers 2003).

La interacción térmica que puede ocurrir entre un depósito de caída de ceniza y el ambiente es significativamente acotada, al menos en comparación con otros peligros volcánicos, como las corrientes de densidad piroclástica. Sin embargo, existen algunos ejemplos de impactos producidos por efecto de la temperatura del depósito de caída que, en algunos casos, puede incluso superar la temperatura de ignición de ciertos materiales (Blong 1984). Mayormente, las caídas de ceniza volcánica suelen iniciar incendios en ámbitos urbanos de forma indirecta (Quah et al. 2023).

Algunas otras características de peligrosidad de la ceniza volcánica están asociadas a propiedades como: (1) la granulometría, que determina el potencial de removilización eólica y la peligrosidad para la salud humana (Horwell & Baxter 2006; Hansell et al. 2006); (2) el nivel de toxicidad (Baxter et al. 1999; Hansell et al. 2006); (3) la friabilidad y la capacidad de la ceniza para generar bloqueos u obstrucciones (Wilson et al. 2012a); (4) la flotabilidad de los fragmentos vesiculados (Manville et al. 1998) y la capacidad de formar *pumice rafts*, acumulaciones flotantes y móviles de fragmentos pumíceos de baja densidad generados por erupciones volcánicas silíceas (Whitham & Sparks 1986); (5) la capacidad de formar agregados (Brown et al. 2012); (6) las

propiedades radiativas del depósito de ceniza (Jones et al. 2007; Ayrís & Delmelle 2012); (7) el oscurecimiento y la disminución de la visibilidad atmosférica (Blong 1984); etc.

A su vez, estos volúmenes de material piroclástico inconsolidado y depositados de manera casi instantánea son propensos a ser removilizados por distintos tipos de agentes (**sección 3.4.1**) y favorecen a la ocurrencia de fenómenos asociados como los deslizamientos subácueos y procesos tsunamigénicos asociados (**sección 3.4.2**).

1.6. Sobre los casos de estudio

En un lapso de tan solo 25 años, cuatro eventos muy significativos de caídas piroclásticas ($VEI \geq 4$) afectaron la Patagonia argentina, sobre los cuales discurre el presente trabajo de investigación. Pero también se consideran algunos otros antecedentes de erupciones volcánicas más antiguas, y otros casos de desastre, ajenos al volcanismo andino activo (**sección 1.6.5; sección A5**). A continuación, se describen detalladamente algunos de los casos de estudio más significativos.

1.6.1. La erupción del volcán Hudson de 1991

Contexto geológico

El volcán Hudson ($45,90^\circ \text{ S} - 72,97^\circ \text{ O}$; Chile) es el centro volcánico más austral de toda la ZVS de los Andes (Stern 2004). Se ubica a unos 95 km al sur del complejo volcánico más cercano Macá-Cay ($45,06^\circ \text{ S} - 72,98^\circ \text{ O}$; Chile) y a unos 280 km al noreste del punto triple, donde colindan las placas litosféricas de Nazca, Antártica y Sudamericana (Naranjo et al. 1993; Kratzman et al. 2009). El volcán Hudson es un gran complejo con una caldera sumital de unos 10 km de diámetro, de edad pleistocena inferior a holocena (Ponce 1976; Naranjo et al. 1993; Naranjo & Stern 1998) y actualmente se encuentra cubierto por hielo glaciario que drena prominentemente hacia el noroeste, a través del Ventisquero de los Huemules, hacia el valle del Río Huemules (Branney & Gilbert 1995; Gutiérrez et al. 2005). El complejo se encuentra también rodeado por numerosos centros volcánicos monogenéticos (Gutiérrez et al. 2005).

En términos geoquímicos, los magmas emitidos por el volcán Hudson varían desde composiciones basálticas a andesitas-basálticas, incluyendo algunas dacitas (Naranjo & Stern 1998; Orihashi et al. 2004). La mayor parte de las muestras de tefra analizadas se agrupan en dos campos, por debajo y por encima del 53% de SiO_2 , sugiriendo una marcada tendencia química bimodal (López-Escobar et al. 1993; Naranjo et al. 1993; Bitschene & Fernández 1995).

Historia eruptiva

El complejo se encuentra activo desde hace al menos unos 1,5 Ma (González-Ferrán 1995; Stern & Naranjo 1995). Sin embargo, dada su ubicación remota, el volcán Hudson se conoce como tal desde 1971, luego de que una erupción pliniana ($VEI: 3$; Fuenzalida & Espinoza 1974) originara una serie de flujos de lahares catastróficos (Best 1992; Orihashi et al. 2004).

Durante el Holoceno, su actividad estuvo caracterizada por erupciones de gran explosividad, incluyendo al menos 12 periodos eruptivos confirmados (Stern & Naranjo 1995; Naranjo & Stern 1998). Entre estos, se destacan las erupciones ocurridas en 3.600 años BP (VEI: 6; Kilian et al. 2003) y 6.720 años BP (VEI: 6; Naranjo & Stern 1998; Stern 2020), siendo esta última la mayor erupción holocena ocurrida en los Andes del Sur, emitiendo un volumen de más de 18 km³ de tefra (Naranjo & Stern 1998; Stern 2020).

AÑO	FECHA DE INICIO	FECHA DE FIN	VEI (máximo)	EVICENCIAS
2011	26 de oct	1 de nov	2	Confirmada, reportada
1991	8 de ago	27 de oct	5	Confirmada, reportada
1971	12 de ago	18 de sep	3	Confirmada, reportada
1981	-	-	-	Confirmada, reportada
1740 ± 150 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴C sin calibrar)
860 ± 100 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
390 ± 150 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
120 BCE ± 200 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
790 BCE ± 75 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
1890 BCE (¿?)	-	-	6	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
2250 BCE	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
3890 BCE ± 500 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
4750 BCE (¿?)	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
4960 BCE ± 150 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
8010 BCE (¿?)	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)

Tabla 1.4. Historia eruptiva holocena del volcán Hudson; en negrita, erupciones volcánicas ocurridas en tiempos históricos (GVP 2013).

La erupción de agosto de 1991

La erupción de volcán Hudson de 1991 (VEI: 5; Naranjo et al. 1993; **Figura 1.11**) fue considerada una de las mayores erupciones volcánicas ocurridas durante el siglo XX en el mundo (Naranjo et al. 1993; Scasso et al. 1994; Kratzmann et al. 2010).

Después de un período de veinte años de inactividad, el volcán Hudson inició un nuevo ciclo eruptivo la tarde del 8 de agosto de 1991. Dada su ubicación remota, no se detectó ningún tipo de actividad precursora a nivel regional, excepto por algunos sismos de baja intensidad ocurridos unas 4 horas antes de la primera explosión, percibido por de pobladores del Valle Huemules a unos 40 km del volcán (Naranjo et al. 1993). La erupción consistió en dos fases explosivas, ocurridas la primera entre el 8 y 9 de agosto y la segunda, de mayor energía, entre el 12 y el 15 de agosto. La erupción, de tipo freato-pliniana y parcialmente sub-glacial (Naranjo et al. 1993) ocurrió a través de distintos focos del complejo de caldera y fue considerada una de las mayores erupciones volcánicas ocurridas durante el siglo XX en el mundo (Naranjo et al. 1993; Scasso et al. 1994; Kratzmann et al. 2010). Naranjo et al. (1993) reconstruyen una cronología en detalle de este ciclo eruptivo, la cual sólo pudo establecerse a partir de la recopilación de testimonios y observaciones directas parciales, las cuales se dificultaron por condiciones meteorológicas adversas que perduraron durante gran parte de la erupción.

La erupción freato-magmática inició alrededor de las 18:20 hs y se caracterizó por el ascenso de una columna eruptiva blanca de hasta 12 km de altura, que se dispersó en dirección predominantemente nor-noreste. Durante esta primera fase numerosos flujos de escoria cubrieron la parte occidental y septentrional de la caldera del volcán. También se identificaron numerosos lahares que fluyeron raudamente hacia el Valle Huemules. Entre las 21 hs y 22 hs del mismo primer día, se produjeron rompimientos en el frente del Ventisquero Huemules (*Jokulhlaup*) y en el flanco oeste-sureste de la caldera, que avanzaron hacia los valles de los ríos de los Huemules y Sorpresa Sur. Al día siguiente, el 9 de agosto, la columna eruptiva había disminuido en altura, a unos 6 km sobre el borde occidental de la caldera y se dispersó hacia el nor-noroeste. Ya para el 10 de agosto, la actividad eruptiva había disminuido notablemente.

Dos días después, alrededor del mediodía del 12 de agosto, inició la fase paroxísmica de la segunda etapa eruptiva, que se extendió por tres días y fue la que dispersó el mayor volumen de material piroclástico hacia el este-sureste, cubriendo un área estrecha pero elongada de la Provincia de Santa Cruz (Scasso et al. 1994). Esta segunda fase ocurrió a través de un cráter principal ubicado 4 km al sureste de los focos emisores asociados a la primera fase, e involucró columnas eruptivas que alcanzaron los 18 km de altura (Naranjo et al. 1993; Kratzmann et al. 2010). Para el 15 de agosto, la pluma volcánica había alcanzado incluso las Islas Malvinas, a unos 1.200 km de distancia del volcán (GVP 2013).

Esta erupción se destacó por la ocurrencia de un cambio abrupto en la composición de un magma basáltico a basalto-andesítico en la primera fase, a un magma traquiandesítico a riodacítico durante la segunda (Naranjo et al. 1993; Bitschene & Fernandez 1995; Kratzmann et al. 2009). El análisis de los materiales eruptados, la distribución especial de los centros eruptivos y las evidencias geoquímicas disponibles sugieren que la erupción estuvo asociada a la intrusión de un dique basáltico en una cámara magmática traquiandesítica preexistente, ubicada a 3 km de profundidad del complejo de caldera (Naranjo et al. 1993; Kratzmann et al. 2009). La erupción produjo un volumen de tefra de entre 4 y 7 km³ o 2.7 km³ DRE, cubriendo un territorio total de más de 150.000km² en Chile y Argentina (Naranjo et al. 1993; Scasso et al. 1994; Kratzmann et al. 2010). Si bien para el 16 de agosto la emisión y caída de ceniza volcánica habían cesado por completo, la intensa y perdurable removilización eólica de material piroclástico tuvo un efecto terminante en muchas de las comunidades rurales de Chile y Argentina (Scasso et al. 1994; Naranjo & Stern 1998; Wilson et al. 2010a; **Figura 1.11**). En el corto y largo plazo, esto significó la evacuación de personas y ganado; impactos en la actividad agrícola, hortícola y ganadera; efectos adversos en la salud humana y animal; daño y disrupción en servicios de infraestructura crítica; e incluso el abandono definitivo de muchos establecimientos (Wilson et al. 2010a; 2012b; Salgado et al. 2022; 2023).

Actividad más reciente

Luego de la erupción de 1991, se detectó una inflación casi constante del terreno y evidencias de actividad sísmica (Fournier et al. 2010). Veinte años después, el volcán Hudson entró nuevamente en erupción el 25 de octubre de 2011 (VEI: 1-2; Amigo et al. 2012). La erupción ocurrió a través de tres nuevos cráteres e involucró el ascenso de columnas eruptivas que alcanzaron un máximo de 5.5 km de altura (OVDAS 2011a; Amigo et al. 2012). La erupción se reportó como

finalizada el 2 de noviembre del mismo año (OVDAS 2011b). La ONEMI reportó que para el 27 de octubre (dos días después de iniciada la erupción) unas 128 personas debieron ser evacuadas del área ubicada dentro de un radio de 45 km a la redonda del volcán. Para el 30 de octubre del mismo año, el total de evacuados había ascendido a 140 personas en total (<https://senapred.cl/>).

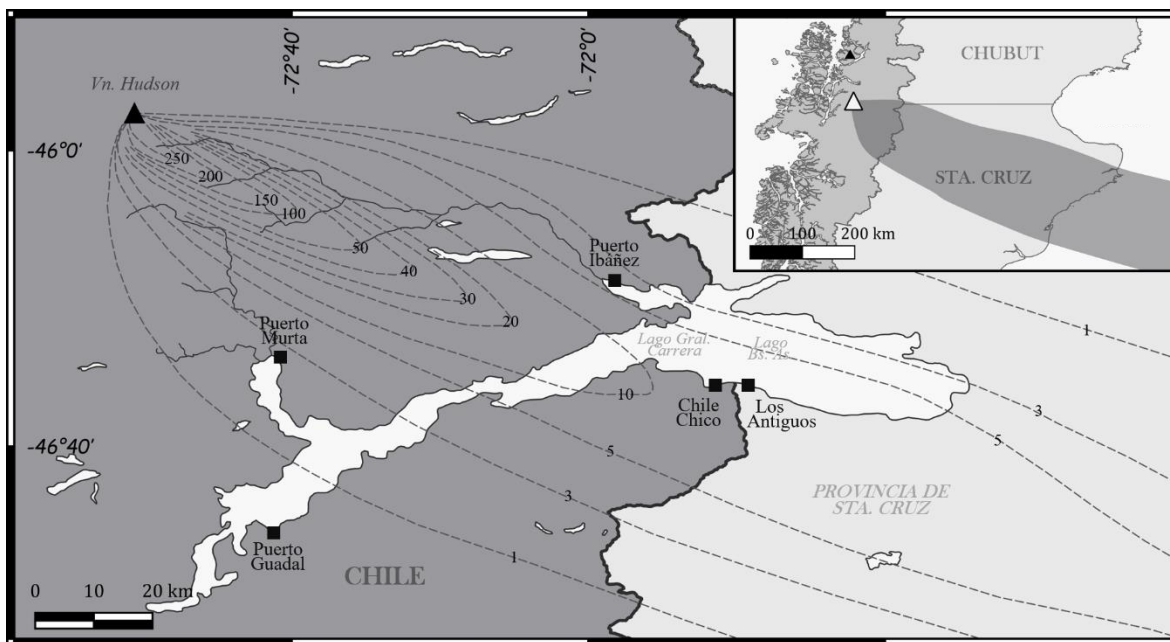


Figura 1.11. Mapa de isópacas (en centímetros) de la erupción del volcán Hudson de 1991 (basado en: Scasso et al. 1994) en la región del Lago Buenos Aires (Argentina) General Carrera (Chile) y ubicación de los principales sitios portuarios afectados. Arriba a la derecha, la distribución del depósito de tefra de >1 mm de espesor de caída.

1.6.2. La erupción del volcán Chaitén de 2008

Contexto geológico

El volcán Chaitén ($42,83^{\circ}$ S - $72,65^{\circ}$ O; Chile) es un complejo relativamente pequeño y despejado de cubierta glaciaria, conformado por un domo riolítico holoceno emplazado en una caldera de unos 3 km de diámetro, acompañado por otros domos parásitos (Kilian & López-Escobar 1991; López-Escobar et al. 1993). Este domo fue parcialmente destruido por la erupción de 2008 y reconstruido nuevamente durante el mismo ciclo eruptivo (Lara 2009). Actualmente, el nuevo domo de $\sim 1 \text{ km}^3$ de volumen ocupa el centro de la caldera y mantiene una actividad fumarólica débil.

El volcán también forma parte del segmento más austral de la ZVS (Stern 2004), se ubica inmediatamente al oeste del volcán Michinmahuida ($42,79^{\circ}$ S - $72,44^{\circ}$ O; Chile) y a tan solo 10 km de la localidad homónima, capital de la provincia de Palena en la Región de Los Lagos (Chile). La caldera está formada por una secuencia preglaciaria andesítica-basáltica de lavas y brechas y aparece profundamente erodada en su sector suroeste por el río que drena hacia la bahía donde se encuentra ubicada la ciudad de Chaitén (Kilian & López-Escobar 1991; López-Escobar et al. 1993; González-Ferran 1995).

Historia eruptiva

La historia eruptiva del volcán previa al último máximo glacial permanece relativamente oculta, debido al efecto de la glaciación andina de piedemonte en esta región, aunque en los sectores más orientales de la Cordillera, a sotavento, existen numerosas secuencias lacustres que preservan niveles de tefra asociados al volcán Chaitén, que se remontan a aproximadamente 18.000 años cal BP (Iglesias et al. 2011; Moreno et al. 2015; Alloway et al. 2017). Para este mismo periodo, una secuencia de lavas andesítico-basálticas sugiere un periodo de volcanismo subglacial (Pichler & Zeil 1971).

Notablemente, y hasta el momento de la erupción del año 2008, se consideraba que la actividad más reciente del volcán estaba representada por un depósito prominente de lapilli pumíceo datado de manera indirecta a partir de carbón vegetal en menos de 9370 ± 60 años 14C AP (Naranjo & Stern 2004), exceptuando algunas pocas referencias a eventos volcánicos ocurridos entre los siglos XVIII y XIX (Naranjo & Stern 2004; Petit-Breuilh Sepúlveda 2004; Lara et al. 2013; Moreno et al. 2015). Así, la erupción de 2008 resultó ser la primera y única erupción histórica del volcán identificada a partir de observaciones directas (Lara 2009), impulsando entonces importantes investigaciones acerca de la historia eruptiva holocena del volcán (p.ej., Amigo et al. 2013; Lara et al. 2013; Watt et al. 2013). Para ese periodo, se destacan las erupciones ocurridas en 9.370 BP, 7.750 BP y 5.080 BP.

La actividad eruptiva de los últimos 10 mil años incluye importantes eventos explosivos de gran magnitud. Estos se caracterizan no solo por su explosividad, sino también por haber evacuado magmas de composición riolítica, una composición inusual en este sector de los Andes y muy contrastante respecto a los productos generados por el volcán vecino Michinmahuida (Naranjo & Stern 2004; Amigo et al. 2013; Major & Lara 2013).

AÑO	FECHA DE INICIO	FECHA DE FIN	VEI (máximo)	EVIDENCIAS
2008	2 de may	31 de may $\pm$ 3 días	4	Confirmada, reportada
1640 $\pm$ 18 años	-	-	4 (¿?)	Confirmada (^{14}C calibrada)
3100 BCE $\pm$ 220 años	-	-	5	Confirmada (^{14}C calibrada)
6650 BCE $\pm$ 1300 años	-	-	-	Tefrocronología
7750 BCE $\pm$ 200 años	-	-	5	Confirmada (^{14}C calibrada)

Tabla 1.5. Historia eruptiva holocena del volcán Chaitén; en negrita, erupciones volcánicas ocurridas en tiempos históricos (GVP 2013).

La erupción de mayo de 2008

La erupción del volcán Chaitén de 2008 (VEI: 4; Watt et al. 2009; Alfano et al. 2011; **Figura 1.12**) fue un evento notorio en varios sentidos. Principalmente, por el poco conocimiento previo acerca de la peligrosidad asociada al volcán; por la poca actividad precursora denostada; y por ser una de las únicas tres erupciones riolíticas observadas en tiempos históricos, junto a las erupciones de los volcanes Katmai-Novarupta de 1912 en Alaska, y los flujos lávicos observados durante la fase efusiva de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 (Carn et al. 2009; Watt et al. 2009).

Siendo prácticamente desconocido para los habitantes de la región, el volcán inició su erupción cerca de la medianoche del 1 de mayo de 2008 (Castro & Dingwell 2009; Lara 2009; Watt et al. 2009). La actividad sísmica identificada permitió interpretar un rápido ascenso de magma a través de un dique desde una profundidad de entre 5 y 9 km en tan solo 4 horas (Carn et al. 2009; Watt et al. 2009; Pallister et al. 2013). La fase explosiva inicial se extendió hasta el 12 de mayo del mismo año, pero fue más energética durante la primera semana, produciendo tres eventos plinianos los días 2, 6 y 8 de mayo (Watt et al. 2009; Alfano et al. 2011; Pallister et al. 2013). La columna eruptiva asociada al primer pulso del 2 de mayo se elevó hasta los 20 km a 22 km de altura (Carn et al. 2009) y la pluma se dispersó hacia sureste a través de los Andes, a partir de donde viró de forma difusa hacia el norte y alcanzó la ciudad de Bariloche (Watt et al. 2009; Alfano et al. 2011; Durant et al. 2012). Este evento fue seguido por una fase sostenida de menor energía, con columnas eruptivas de menos de 10 km de altura y una dirección de dispersión bien definida hacia el sureste-este (Watt et al. 2009; Alfano et al. 2011; Durant et al. 2012). El segundo pulso del 6 de mayo, de mayor energía, produjo columnas que superaron los 30 km de altura, que se dispersaron hacia el noreste y viraron luego al este-noreste (Watt et al. 2009; Alfano et al. 2011; Pallister et al. 2013). El tercer evento del 8 de mayo dispersó materiales piroclásticos en direcciones similares al evento anterior del 6 de mayo (Folch et al. 2008). En los tres casos, las explosiones plinianas generaron corrientes de densidad piroclástica moderadas sobre los flancos norte, noreste y este del volcán (Lara 2009).

Diez días después de iniciada la erupción, el 11 y 12 de mayo, se produjo un evento catastrófico de removilización del inmenso volumen de material piroclástico depositado en cuencas proximales del volcán. Las precipitaciones que siguieron a la erupción generaron continuos flujos de lahares complejos, canalizados a través del Río Blanco, que sepultaron gran parte de la localidad de Chaitén (Pierson et al. 2013; Major et al. 2016; Rodríguez Torrent et al. 2016). Los años subsiguientes, la removilización fluvial del material piroclástico continuó movilizand o inmensos volúmenes de sedimentos hacia los fiordos de la bahía (Pierson et al. 2013; Major et al. 2016).

La fase explosiva inicial fue seguida por una fase transicional explosiva/efusiva de menor energía, que se prolongó a través de los meses subsiguientes. Durante esta fase, se generaron columnas de entre 2 km y 5 km de altura, con poca evidencia de caídas piroclásticas en Argentina (Watt et al. 2009). Esto último, con excepción de algunos reportes de caída cerca del límite internacional, entre el 30 y 31 del mismo mes (Watt et al. 2009; Alfano et al. 2011). La erupción emitió un total de $\sim 1 \text{ km}^3$ de material riolítico fragmentado y casi 0.8 km^3 de lava (Pallister et al. 2013). La composición de los materiales eruptados se mantuvo notablemente constante, no solo durante toda la fase eruptiva de 2008, sino también durante las fases y eventos previos de crecimiento del domo de lava riolítico (Pallister et al. 2013).

Las sucesivas plumas generadas durante la erupción dispersaron enormes volúmenes de material piroclástico sobre gran parte del territorio argentino, afectando principalmente a las provincias de Río Negro y Chubut (Carn et al. 2009; Watt et al. 2009; Alfano et al. 2011; Durant et al. 2012; **Figura 1.12**) y causando una variedad de efectos adversos en el medio ambiente y la sociedad (p. ej., Martin et al. 2009; Stewart et al. 2009; 2011; Wilson et al. 2009c; 2009d; Mandujano et al. 2015; Salgado et al. 2022; 2023).

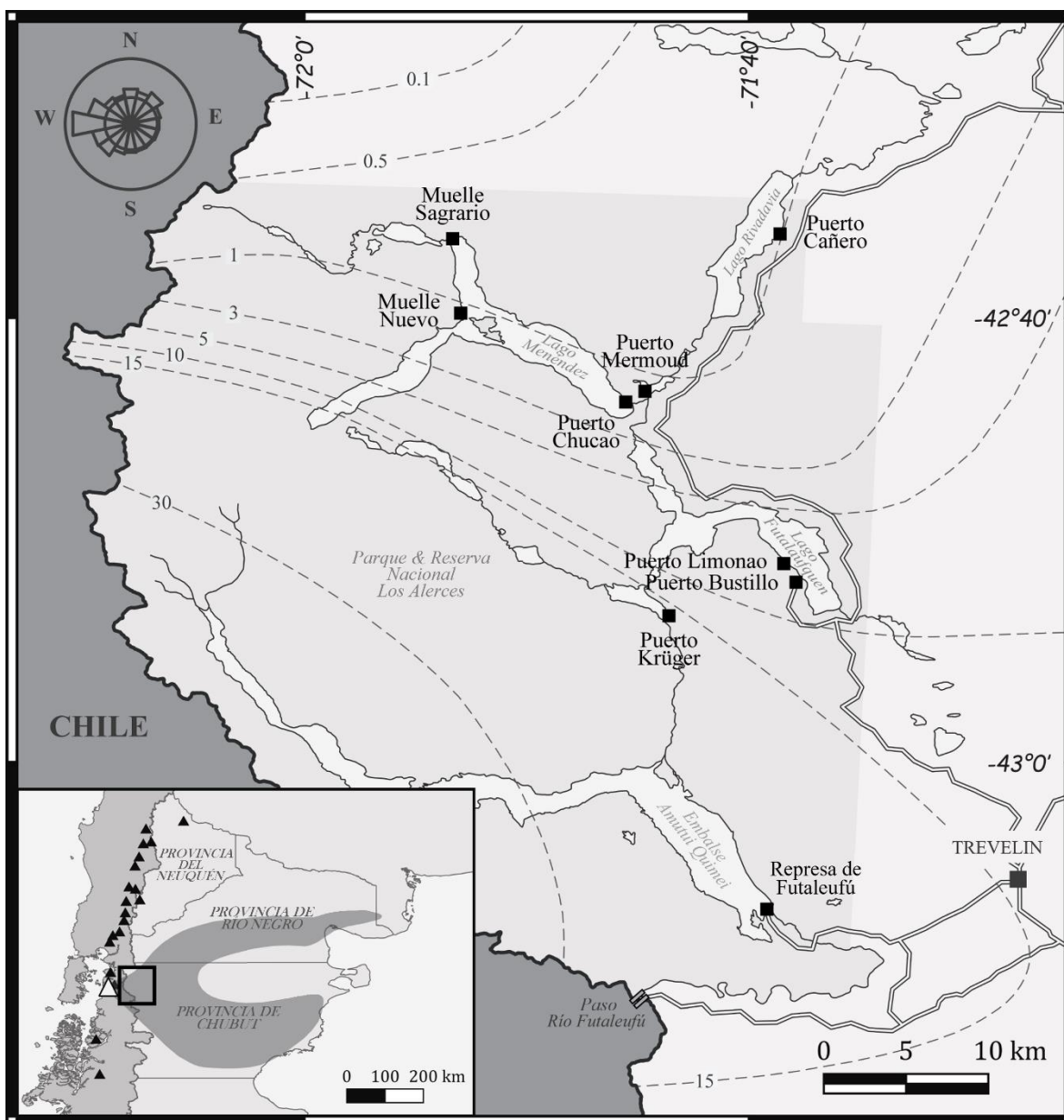


Figura 1.12. Mapa de isópacas (en milímetros) de la erupción del volcán Chaitén de 2008 (basado en Watt et al. 2009; Alfano et al. 2011) en la región del Parque y Reserva Nacional Los Alerces, y ubicación de los principales sitios portuarios afectados. El diagrama de rosa de vientos indica la distribución anual relativa de frecuencias de dirección (origen) de los vientos anuales. Abajo a la izquierda, la distribución del depósito de tefra de >0.1 mm de espesor de caída.

1.6.3. La erupción del Cordón Caulle de 2011-2012

Contexto geológico

El Cordón Caulle ($40,50^{\circ}$ S - $72,20^{\circ}$ O; Chile) es un sistema de fisuras que ocupa una depresión volcano-tectónica de unos 13 km de longitud y que forma parte del Complejo Volcánico

Puyehue-Cordón Caulle. Este complejo del Pleistoceno medio - Holoceno forma parte del subsegmento central de la ZVS (Stern 2004) y está constituido por un conjunto de volcanes de distintas características. Entre estos, los más conspicuos son: (1) la caldera pleistocena Cordillera Nevada; (2) el sistema de fisuras Cordón Caulle; y (3) el estratovolcán basáltico-riolítico holoceno Puyehue (Gerlach et al. 1988; Lara et al. 2006).

El Cordón Caulle representa la mayor zona geotermal activa de la ZVS, abarca varios centros eruptivos y se elonga en dirección noroeste sureste separando hacia sus extremos la caldera Cordillera Nevada (al noroeste) y el volcán Puyehue (al sureste) (Lara et al. 2004). Las erupciones más recientes registradas en el complejo se consignan para el Cordón Caulle y han emitido productos de composiciones predominantemente riodacíticas, incluyendo algunas composiciones riolíticas subordinadas (Lara et al. 2006; Castro et al. 2013). Las composiciones más evolucionadas predominan en las unidades más jóvenes del Cordón Caulle y Puyehue (Gerlach et al. 1988).

Historia eruptiva

El registro eruptivo del complejo se extiende al Pleistoceno medio, con unidades datadas en ~450 mil años (Lara et al. 2006). Sin embargo, la actividad holocena se ha concentrado fundamentalmente en el volcán Puyehue y en el Cordón Caulle (Villarosa et al. 2006; Lara et al. 2006; Singer et al. 2008) siendo este último el único con actividad en tiempos históricos. Durante su evolución, los productos volcánicos emitidos por el Cordón Caulle denotan un amplio rango de composiciones, que varían desde basaltos a riolitas; y de estilos eruptivos, que han fluctuado desde erupciones efusivas a eventos explosivos plinianos, a los cuales se atribuyen la evacuación de materiales riodacíticos y riolíticos (Lara & Moreno 2006; Lara et al. 2006).

Entre las 11 erupciones históricas registradas para el Cordón Caulle (algunas de ellas atribuidas con anterioridad al volcán Puyehue) se incluyen las reconocidas erupciones de 1921-1922 (VEI: 3; Gerlach et al. 1988; Lara et al. 2006; Singer et al. 2008); la erupción fisural riodacítica de 1960 (VEI: 3; Lara et al. 2004); y la reciente erupción de 2011-2012 (VEI ~4-5; Bonadonna et al. 2015a).

AÑO	FECHA DE INICIO	FECHA DE FIN	VEI (máximo)	EVIDENCIAS
2011	4 de jun	12 de ago de 2012	4-5	Confirmada, reportada
1990	2 de jul	182 días	1	Confirmada, reportada
1960	24 de may	30 de jul	3 (¿?)	Confirmada, reportada
1934	6 de mar	-	2	Confirmada, reportada
1929	7 de ene	-	2	Confirmada, reportada
1921 (Cordillera Nevada)	13 de dic	12 de feb	3	Confirmada, reportada
1919	-	1920	2	Confirmada, reportada
1914	8 de feb	-	2	Confirmada, reportada
1905 (¿?)	-	-	2	Confirmada, reportada
1893 (¿?)	-	-	2	Confirmada, reportada
1759 (¿?)	-	-	2	Confirmada, reportada

Tabla 1.6 (parte 1). Historia eruptiva holocena para el Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle; en negrita, erupciones volcánicas ocurridas en tiempos históricos (GVP 2013).

AÑO	FECHA DE INICIO	FECHA DE FIN	VEI (máximo)	EVIDENCIAS
1220 ± 150 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
1140 ± 100 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
860 ± 75 años (Puyehue)	-	-	5	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
500 ± 100 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
140 ± 300 años (¿Puyehue?)	-	-	-	Tefrocronología
110 ± 200 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
490 BCE ± 300 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
990 BCE ± 500 años	-	-	-	Tefrocronología
1490 BCE ± 150 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
3250 BCE ± 2400 años (Puyehue)	-	-	-	Confirmada (Ar/Ar)
4230 BCE ± 200 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
4450 BCE ± 900 años (Puyehue)	-	-	-	Confirmada (Ar/Ar)
4460 BCE (¿?)	-	-	-	Tefrocronología
4690 BCE ± 200 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
5080 BCE ± 150 años (Puyehue)	-	-	5	Confirmada (¹⁴ C calibrada)

Tabla 1.6 (parte 2). Historia eruptiva holocena para el Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle; en negrita, erupciones volcánicas ocurridas en tiempos históricos (GVP 2013).

La erupción de mayo de 1960

La erupción subpliniana del Cordón Caulle de 1960 (VEI: 3; Lara et al. 2004) inició el día 24 mayo, unas 38 horas después del sismo principal asociado al *Terremoto de Valdivia*, que incluye el mayor sismo registrado instrumentalmente en la historia (9.5 Mw; Kanamori 1977). Este pulso explosivo produjo columnas eruptivas de unos 8 km de altura a través de varios focos a lo largo del sistema de fisuras (Lara et al. 2006). La pluma se dispersó predominantemente hacia el sureste del volcán, produciendo caídas de ceniza de hasta 100 mm de espesor a 30 km o 40 km del volcán, afectando extensas áreas de la región del Nahuel Huapi (González-Ferrán 1995; Petit-Breuilh Sepúlveda 2004; Lara et al. 2006).

Los eventos sísmicos que precedieron a la erupción fueron registrados durante los días 21 y 22 de mayo, los cuales se prolongaron hasta el 6 de junio del mismo año, totalizando unos 9 terremotos. A causa de evento, el 22 de mayo se produjo un tsunami en el Lago Nahuel Huapi que afectó las costas de la ciudad de Bariloche, y se produjo la destrucción total del antiguo Pto. San Carlos (**Tabla 1.2**), acompañado por el hundimiento de numerosas embarcaciones amarradas y la pérdida de dos vidas (Chapron et al. 2006; Villarosa et al. 2009).

La erupción de junio de 2011

La última erupción pliniana del Cordón Caulle de 2011-2012 (VEI ~4-5; Bonadonna et al. 2015a; **Figura 1.13**) comenzó en junio de 2011 pero la emisión de cenizas volcánicas fue prácticamente continua hasta finales de ese mismo año, lo que resultó particularmente impactante para las poblaciones que habitan las inmensas áreas de territorio afectado.

La erupción comenzó cerca de las 14:45 hs de día 4 de junio, y estuvo precedida por casi dos meses de actividad sísmica precursora, detectada desde el mes de abril anterior (OVDAS 2010-

2012). Durante los dos días previos a la erupción, la actividad sísmica superficial, localizada entre 2 km y 6 km de profundidad, se intensificó y concentró en el sector sureste del Cordón Caulle, donde posteriormente ocurriría la erupción (Castro et al. 2013). El máximo desarrollo de esta primera fase explosiva ocurrió durante las primeras 27 horas de la erupción, generando columnas eruptivas que alcanzaron niveles estratosféricos y que se dispersaron en dirección predominante al sureste (Castro et al. 2013), así como numerosas corrientes de densidad piroclástica que se movilizaron hacia el valle del río Nilahue (Elissondo et al. 2016).

Los días subsiguientes, el 6 y 7 de junio, ocurrió un segundo pulso explosivo de menor intensidad, con direcciones de dispersión cambiantes hacia el noreste, sureste y este-sureste (Elissondo et al. 2016). Tras diez días de actividad exclusivamente explosiva, la erupción del Cordón Caulle comenzó a involucrar también fases efusivas, produciendo flujos de lava que se registraron desde el día 15 de junio (Castro et al. 2013; Elissondo et al. 2016). La emisión de cenizas se prolongó por varios meses, incluso durante las fases efusivas de la erupción, generando columnas intermitentes y de menor altura (Castro et al. 2013; Elissondo et al. 2016). No fue hasta 12 de agosto del año siguiente que el OVDAS SERNAGEOMIN reportara el cese definitivo de emisión de ceniza volcánica y flujos de lavas (OVDAS 2010-2012; Tuffen et al. 2013).

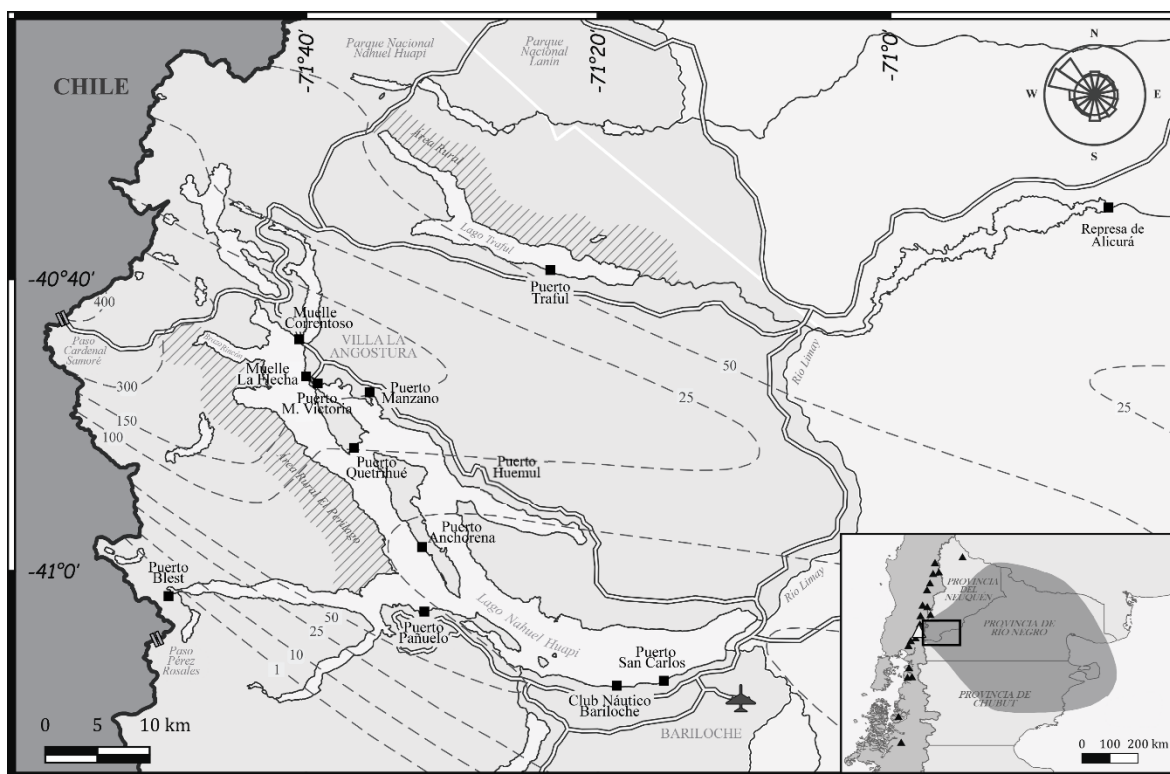


Figura 1.13. Mapa de isópacas (en milímetros) de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 (basado en: Villarosa & Outes 2013; Alloway et al. 2013) en la región del Parque Nacional Nahuel Huapi, y ubicación de los principales sitios portuarios afectados. El diagrama de rosa de vientos indica la distribución anual relativa de frecuencias de dirección (origen) de los vientos anuales. Abajo a la derecha, la distribución del depósito de tefra de >1 mm de espesor de caída.

Las plumas eruptivas asociadas se dispersaron predominantemente hacia el este y sureste del volcán, afectando enormes extensiones del territorio argentino, principalmente en las provincias del Neuquén, Río Negro y Chubut (**Figura 1.13**).

Las extensas y persistentes caídas de ceniza volcánica provocaron una serie de impactos con consecuencias devastadoras, no solo por la caída primaria, sino también por los numerosos eventos de removilización fluvial y eólica de los depósitos piroclásticos (Castro et al. 2013; Collini et al. 2013; Wilson et al. 2013; Alloway et al. 2015; Elissondo et al. 2016; Toyos et al. 2017; Beigt et al. 2019; etc.).

1.6.4. La erupción del volcán Calbuco de 2015

Contexto geológico

El volcán Calbuco (41,33° S - 72,61° O; Chile) es otro de los volcanes más activos de la región (Stern 2004) y forma parte del extremo más austral del subsegmento central de la ZVS. Se ubica inmediatamente al sureste del Lago Llanquihue, a sólo 30 km de las localidades de Puerto Varas y Puerto Montt, en la Región de Los Lagos, Chile. Y a diferencia de muchos de los volcanes del arco patagónico, su localización no estaría claramente controlada por estructuras regionales, sino que se halla al oeste de la traza de sistema de *Fallas Liquiñe-Ofqui* (Hickey-Vargas et al. 1995; López-Escobar et al. 1995). El Calbuco es un estratovolcán compuesto del Pleistoceno tardío - Holoceno con forma de cono truncado y perfil irregular, coronado por un cráter de hasta 500 m de amplitud y pequeños glaciares (Sellés & Moreno 2011).

Historia eruptiva

El edificio volcánico se ha construido durante los últimos ~300 mil años, emitiendo durante una primera etapa (~340 - 110 mil años) productos de composición andesítica basáltica y, durante una segunda etapa pre-glaciaria (~110 - 14 mil años) andesitas y dacitas (Sellés & Moreno 2011). Un evento de colapso lateral formado hace ~14 mil años provocó la apertura de una caldera elíptica de 2 km de amplitud (Moreno 1999; Sellés & Moreno 2011). A partir de este evento, y durante todo el Holoceno, la actividad eruptiva se concentró dentro de esta caldera, emitiendo productos de composición andesítica a andesita basáltica e incluso algunas dacitas, formando un domo andesítico en su interior (Moreno 1999; Sellés & Moreno 2011). Su historia holocena incluye numerosas erupciones explosivas sub-plinianas (Petit-Breuilh 1999) y al menos dos eventos de colapso mayores (Clavero et al. 2008).

En tiempos históricos, el volcán Calbuco originó productos de composición andesita basáltica a andesítica (López-Escobar et al. 1995; Sellés & Moreno 2011). Desde 1792, se contabiliza un total de 14 erupciones confirmadas con observación directa (Petit-Breuilh 1999; GVP 2013). Entre estas, la erupción de mayor intensidad registrada corresponde a la de 1893-1895 (VEI: 4; Petit-Breuilh 1999). En 1961, aproximadamente nueve meses después del gran *Terremoto de Valdivia* (**sección 1.5.3**) (González-Ferrán 1995) el Calbuco generó una erupción (VEI: 3) cuyas columnas eruptivas alcanzaron unos ~12 km de altura (Romero et al. 2013) afectando el área noreste del volcán, incluida la ciudad de Bariloche (González-Ferrán 1995; Petit-Breuilh 1999).

AÑO	FECHA DE INICIO	FECHA DE FIN	VEI (máximo)	EVIDENCIAS
2015	22 de abr	26 de may	4	Confirmada, reportada
1972	26 de ago	26 de ago	2	Confirmada, reportada
1961	1 de feb	26 de mar	3	Confirmada, reportada
1945	-	-		Confirmada, reportada
1932	-	-		Confirmada, reportada
1929	6 de ene	-	3 (¿?)	Confirmada, reportada
1917	abr	may	3 (¿?)	Confirmada, reportada
1911		1912	2	Confirmada, reportada
1909	mar	-	2	Confirmada, reportada
1907	22 de abr	-	2 (¿?)	Confirmada, reportada
1906	-	-	4	Confirmada, reportada
1894	16 de nov	1895 (¿?)	-	Confirmada, reportada
1893	7 de ene	16 de ene	-	Confirmada, reportada
1837	-	1838	-	Desacreditada
1792 (¿?)	-	-	-	Confirmada, reportada
1600 ± 75 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
1380 ± 50 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
710 ± 60 años	-	-	4	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
520 ± 200 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
220 ± 75 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
160 ± 135 años	-	-	4	Tefrocronología
40 ± 75 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
1000 BCE ± 100 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
330 BCE ± 200 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
1920 BCE ± 50 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
4300 BCE ± 150 años	-	-	-	Confirmada (¹⁴ C sin calibrar)
5030 BCE ± 180 años	-	-	4	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
5820 BCE ± 800 años	-	-	4	Tefrocronología
6300 BCE ± 1035 años	-	-	-	Tefrocronología
6760 BCE ± 825 años	-	-	5	Tefrocronología
7550 BCE ± 45 años	-	-	4	Confirmada (¹⁴ C calibrada)
7930 BCE ± 275 años	-	-	-	Tefrocronología
7990 BCE ± 290 años	-	-	-	Tefrocronología
8100 BCE ± 1300 años	-	-	-	Tefrocronología
8210 BCE ± 290 años	-	-	-	Tefrocronología
8320 BCE ± 250 años	-	-	-	Tefrocronología
8460 BCE ± 155 años	-	-	5	Confirmada (¹⁴ C calibrada)

Tabla 1.7. Historia eruptiva holocena confirmada para el volcán Calbuco; en negrita, erupciones volcánicas ocurridas en tiempos históricos (GVP 2013).

La erupción de abril de 2015

Tan solo cuatro años después de la erupción del Cordón Caulle de 2011, y a 53 años de su última gran erupción, el volcán Calbuco produjo una nueva fase eruptiva en abril de 2015 (VEI: 4; Romero et al. 2016; Van Eaton et al. 2016; **Figura 1.14**).

Si bien desde febrero de 2015 el volcán ya exhibía un aumento de la actividad sísmica, la actividad precursora se hizo significativa recién el mismo 22 de abril, con muy pocas horas de anticipación (OVDAS 2015a; Castruccio et al. 2016). A las 21:04 hs, comenzó un nuevo ciclo eruptivo sorprendentemente explosivo del volcán Calbuco (OVDAS 2015b). La erupción involucró dos pulsos

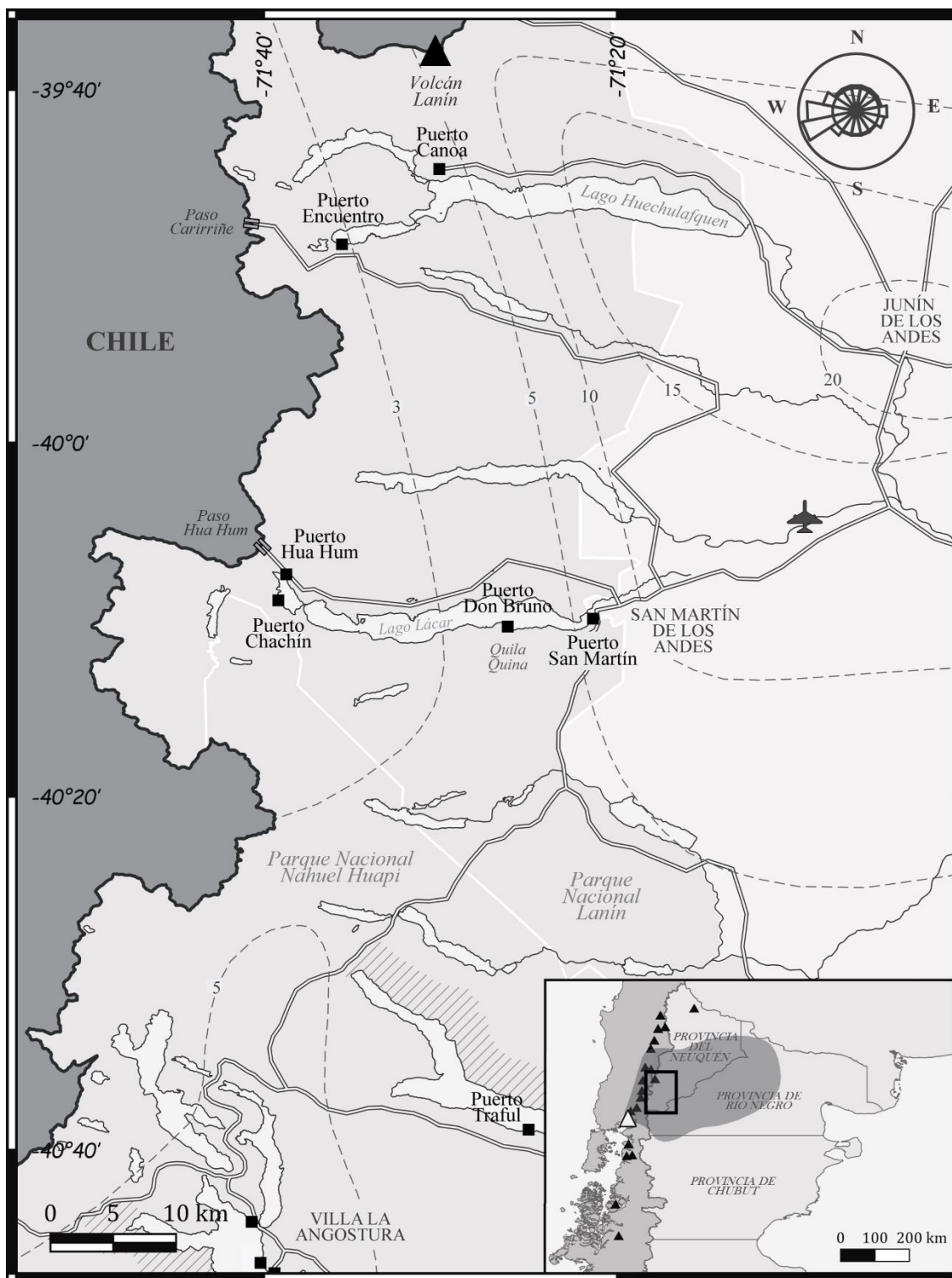


Figura 1.14. Mapa de isópacas (en milímetros) de la erupción del volcán Calbuco de 2015 en la región de los Parques Nacionales Nahuel Huapi y Lanín, y ubicación de los principales sitios portuarios afectados. El diagrama de rosa de vientos indica la distribución anual relativa de frecuencias de dirección (origen) de los vientos anuales. Abajo a la derecha, la distribución del depósito de tefra de >0.1 mm de espesor de caída.

sub-plinianos principales, ocurridos el 22 y 23 de abril, separados por tan solo 5 horas de pausa y relajación del sistema, con duraciones respectivas de 1.5 y 6 horas (OVDAS 2015c; Castruccio et al. 2016). El 30 de abril, una semana después, ocurrió un tercer y menor pulso explosivo (Romero et al. 2016; Van Eaton et al. 2016). Los dos primeros pulsos sub-plinianos generaron, respectivamente, columnas eruptivas de ~15 km, que se dispersaron primero hacia el noreste y luego al noroeste; y de ~17 km de altura, que se dispersaron al este-noreste (Romero et al. 2016). El tercer pulso generó columnas con alturas inferiores a los 4 km, dispersadas hacia el sureste (Romero et al. 2016).

La erupción de 2015 generó un total de entre 0.267 km³ y 0.277 km³, o ~0.11 km³ y 0.13 km³ DRE (Castruccio et al. 2016; Romero et al. 2016) y afectó amplias regiones de Patagonia argentina (**Figura 1.14**), algunas de ellas, previamente impactadas por las caídas de ceniza de 2011-2012 (**sección 1.5.3**).

1.6.5. Otros antecedentes de desastre

La crisis geo-meteorológica del invierno de 2019 en Villa La Angostura

Patagonia está expuesta a un gran número y variedad de peligros asociados (**sección 3.4**), o incluso ajenos (**sección A5**) al volcanismo andino activo. Estos han puesto de manifiesto, de forma reiterada, la importancia del transporte naval para el manejo de situaciones de emergencia (Salgado et al. 2022). Durante el invierno de 2019, una tormenta de nieve y un inmenso volcamiento de rocas interrumpieron los únicos dos accesos viales a la localidad de Villa La Angostura, aislándola territorialmente a lo largo de todo un mes. En el **Anexo A** se ofrece una reconstrucción detallada de estos dos acontecimientos (**sección A5**) y un resumen narrativo de las acciones de respuesta a la emergencia que se realizaron en consecuencia (**sección A5.1 - sección A5.4**).

Capítulo 2

Evacuaciones náuticas: el transporte naval para el manejo de emergencias

2.1. Marco de investigación

Ya sean provocados por causas naturales o provocados y acelerados por causas antrópicas (IRDR 2014), los *desastres* son eventos que han tenido efectos devastadores para la humanidad a lo largo de toda su historia (WBG 2023). Estos acontecimientos repentinos y destructivos sobrepasan la capacidad de una sociedad para lidiar con ellos y generan una alteración de su funcionamiento habitual, significando pérdidas en términos materiales, económicos, ambientales e incluso humanos (UN General Assembly 2016). Lejos de mermar, pareciera que los perjuicios provocados por los peligros naturales se han incrementado de forma alarmante en las últimas décadas, y posiblemente continúen haciéndolo en años venideros (EM-DAT 2023).

Manejar o gestionar este tipo de eventos significa organizar y ejecutar una serie de medidas que permitan sobrellevar la situación (Peyravi et al. 2021). Estas medidas pueden aplicarse tanto antes, durante como después del evento y, en el largo plazo, contribuyen al desarrollo sostenible de una sociedad (UN General Assembly 2016). El *manejo de la emergencia* o la *gestión de desastres* es entonces un conjunto de procedimientos que se ponen en marcha para la *preparación/prevenición, mitigación, respuesta y recuperación* de una sociedad frente a un determinado peligro o amenaza (Sawalha 2020).

Las *evacuaciones* son una de las estrategias de *preparación y respuesta* más comunes y eficientes a la hora de preservar la seguridad de aquellos que habitan un área afectada, o potencialmente afectada, por uno o varios peligros (p. ej., Perry et al. 1981; Baker 1991; Lindell & Perry 1992). El concepto clásico de *evacuación* (*s. estr.*) habitualmente refiere a la acción de huida o retirada de un área a causa de un peligro concreto o potencial (Leonard 1985). Lógicamente, estas acciones son convenientes sólo cuando las ventajas del abandono superan significativamente a las ventajas de optar por otro tipo de alternativa (Cohn et al. 2006; Haynes et al. 2009; Tomsen et al. 2014). Sin embargo, las evacuaciones constituyen solamente una parte limitada del manejo de emergencias y suelen estar articuladas estrechamente a otras acciones de *preparación y respuesta* (Lindell et al. 2006; Hughey 2008; Marrero et al. 2010). Por ejemplo, el diseño de un plan de respuesta completo puede incluir algunas estrategias de tipo *no-evacuativas*, como lo son la

permanencia deliberada y el refugio *in-situ* de las personas o los animales bajo amenaza. Incluso, decidir no llevar a cabo una evacuación puede implicar la necesidad de realizar una serie de operativos adicionales, dado que los refugiados eventualmente requerirán del aprovisionamiento de suministros básicos y de emergencia, la sustitución *ad hoc* de servicios de infraestructura crítica, asistencia médica, etc. (Haynes et al. 2009). En este sentido, el término *evacuación* (*s. ampl.*) comprenderá todo tipo de movilización de personas, bienes o animales, de forma temporaria o permanente, espontánea u organizada, desde o hacia sitios de mayor seguridad, sea esto antes, durante o después de la ocurrencia o amenaza de ocurrencia de un evento determinado (p. ej., Lindell & Perry 1992; Vogt & Sorensen 1992; UN General Assembly 2016).

Lógicamente, todo tipo de sistema de transporte funcional será un componente vital para el manejo de emergencias, ya que es el único recurso que posibilita cualquier intento de evacuación en su sentido amplio. Por ejemplo, la repentina erupción del volcán La Soufrière (Guadalupe) en julio de 1976 desató la evacuación inmediata y masiva de unas 73.000 personas, entre las cuales muchos competidores del *Tour de Guadalupe* debieron escapar apresuradamente pedaleando sobre sus propias bicicletas (Time 1976). Un transporte funcional también posibilitará muchas otras operaciones que requieran de cierta movilización, como los son las evacuaciones preventivas, el aprovisionamiento precautorio con suministros básicos o de emergencia, los operativos de búsqueda y rescate, el retorno seguro de los evacuados, las obras de remediación, la rehabilitación de zonas afectadas, etc. (p. ej., Perry & Lindell 2007; Phillips 2013; Tomsen et al. 2014).

Ahora bien, emplear un sistema de transporte durante una situación de emergencia se dará en escenarios que, cuanto menos, diferirán de los habituales (Wolshon & Donahue 2013). Esto significa que muchos componentes del sistema podrían verse afectados por una serie de factores que limitarán su funcionamiento óptimo (p. ej., Cutter 2003; Marzocchi & Woo 2007; Moriarty et al. 2007). Si bien por un lado es muy frecuente que todo lo planificado no se termine ajustando por completo a la situación real y que se requiera de varias improvisaciones o readaptaciones (Peyravi et al. 2021), desconocer las características de vulnerabilidad de un sistema de transporte utilizado en situaciones de emergencia es un factor de riesgo descomunemente enorme, que supone exponer a los evacuados y a los equipos de respuesta a situaciones a veces extremas (p. ej., Salgado et al. 2022).

2.1.1. Antecedentes

Si bien todavía no han sido objeto de investigación como tal, las *evacuaciones náuticas* (*s. ampl.*) representan una parte muy importante en la historia sobre desastres y emergencias, documentándose a la fecha una inmensa cantidad de antecedentes muy significativos. Por ejemplo, los ataques terroristas al complejo *World Trade Center* de septiembre de 2001 (Nueva York, EE. UU.) dieron lugar a una de las evacuaciones marítimas más grande de la historia, al completarse el rescate de más de 500.000 civiles a bordo de un centenar de embarcaciones en tan solo 9 horas (Keeney 2021). La tasa de evacuación fue tal que incluso superó a la estimada para la emblemática *Operación Dínamo*, un operativo de rescate de tropas Aliadas de *Dunkerque*, una ciudad portuaria al norte de Francia, a causa de la invasión por parte de la Alemania nazi durante la Segunda Guerra Mundial (Thompson 2011). En total, unos 439.000 soldados fueron evacuados hacia Reino Unido entre el 26

de mayo y el 4 de junio de 1940 a bordo de una flota de ~800 buques, que incluyeron numerosas pequeñas embarcaciones particulares llamadas a servicio (Atkin 1990; Miller 1997).

Entre los casos de evacuaciones iniciadas por peligros naturales, existe el antecedente de evacuación marítima más grande de la historia. En 1906, el terremoto e incendio de San Francisco (California, EE. UU.) significó la evacuación casi inmediata de unos ~60.000 civiles hacia la ciudad de Oakland, atravesando la Bahía de San Francisco a bordo de cualquier tipo de embarcación allí disponible (Grossi & Muir-Wood 2006).

Un ejemplo notable de acciones de respuesta naval *no-evacuativa* se evidencia en los esfuerzos de recuperación desplegados tras el desastre ocasionado por el Huracán Katrina de 2005 en los Estados Unidos. En este caso la importantísima vía fluvial *Luisiana Waterway System*, una parte del río Missouri-Mississippi que conecta a las ciudades de Nueva Orleans y Luisiana con el resto de la región centro-oeste de EE. UU., facilitó el arribo y atracó de embarcaciones con suministros de emergencia y auxilio para la región afectada (Amdal & Swigart 2010). No obstante, los daños materiales más importantes se produjeron justamente en áreas costeras, a causa de inundaciones que provocaron la destrucción de muelles, embarcaciones y casinos flotantes, algunos de los cuales colisionaron con edificaciones ubicadas casi 20 km tierra adentro (Rhome et al. 2006). Muy poco tiempo después, durante la misma temporada de huracanes, todas estas lecciones aprendidas pudieron ser exitosamente puestas en práctica. Numerosas embarcaciones de auxilio fueron estratégicamente preparadas en sitios claves a lo largo del Golfo de México antes de que el Huracán Rita tocara tierra, con el objetivo de brindar asistencia de forma inmediata a los posibles afectados (Amdal & Swigart 2010).

Para el caso específico de los desastres ocasionados por amenazas y peligros volcánicos, Witham (2005) estima que más de 5 millones de personas han requerido ser movilizadas durante el siglo XX a causa de unos 248 eventos volcánicos. Entre estos casos, existen algunos antecedentes significativos de evacuaciones navales (p. ej., Blong 1984; McKee et al. 1985, 2017; Williams 2008; Scott et al. 2010; Fearnley et al. 2018).

Posiblemente uno de los episodios más emblemáticos de la historia sea la huida de los habitantes de las ciudades de Pompeya, Oplontis, Herculano y Estabia durante la erupción del Mt. Vesubio del 79 d.C. (**Figura 2.1**). En su reconstrucción de los hechos, Sigurdsson et al. (1982) estiman que gran parte de la población de Pompeya pudo abandonar la ciudad antes de ser destruida. Esto se logró justamente atravesando la Bahía de Nápoles a bordo de numerosas embarcaciones a remo, en medio de una intensa pero no letal caída piroclástica asociada a una fase eruptiva pliniana inicial (Sigurdsson et al. 1982). Esta primera fase eruptiva pudo ser registrada por *Plinio el Viejo* que se hallaba junto a su sobrino *Plinio el Joven* en el antiguo puerto de Miseno, que albergaba a la *Classis Misenensis*, la flota más importante de la armada romana. Precisamente, *Plinio el Viejo* encuentra su fin intentando dar respuesta a un pedido auxilio desde las proximidades del volcán. Pero los fuertes vientos del norte arrastraron su *cuadrirreme*, un antiguo buque de guerra romano, hasta la ciudad de Estabia, desde donde ya no pudo huir (Lirer et al. 1973; Sigurdsson et al. 1982; 1985).



Figura 2.1. *Éruption du Vésuve et vue de Portici* (Volaire 1767). Este óleo representa un paisaje nocturno capturado desde el Puente de la Magdalena durante la erupción del Mte. Vesubio de 1767 y la huida de los habitantes de la ciudad de Portici vislumbrándose al fondo de la Bahía de Nápoles, en Italia.

Mucho más recientemente, durante la erupción del volcán La Soufrière (San Vicente y Las Granadinas) en abril de 2021, un gran número de embarcaciones de todo tipo, que incluyeron cruceros turísticos, buques de carga, embarcaciones de la marina, etc., colaboraron con la evacuación de las casi 25.000 personas que habitaban las proximidades del volcán. Estos operativos de rescate y albergue de refugiados se vieron, particularmente, obstaculizados por el brote pandémico de COVID-19 (PAHO 2021).

Incluso en regiones volcánicas activas, los fenómenos de reactivación volcánica (Newhall & Dzurisin 1988) han dado lugar a evacuaciones significativas, aun cuando no haya ocurrido una erupción volcánica (Johnston et al. 2002; Potter et al. 2015; Longo 2019). Por ejemplo, el último evento de reactivación registrado entre 1982-1984 en *Campi Flegrei*, una caldera de 13 km de amplitud que abarca parte de Nápoles y el Golfo de Pozzuoli (Del Gaudio et al. 2010) resultó en la evacuación de unos 40.000 habitantes del municipio italiano de Pozzuoli (Barberi et al. 1984).

En algunos casos, los recursos navales también se han utilizado con frecuencia para el traslado y resguardo del ganado. Durante la erupción del volcán Tarawera (Nueva Zelanda) de 1886 (Keam 1988) un total de más de 20.000 cabezas de ganado fueron evacuadas de las áreas afectadas por distintos medios de transporte. Entre estas, varios miles fueron trasladadas en buques de vapor desde el puerto de Whakatane (Bay of Plenty, Isla Norte de Nueva Zelanda) hacia las islas vecinas, una acción que se prolongó por hasta 6 meses después de iniciada la erupción (Wilson et al. 2009a).

En general, las evacuaciones masivas suelen estar más bien asociadas a peligros volcánicos *proximales* (ver selección de casos en Wilson et al. 2012b). Sin embargo, las caídas de ceniza volcánica también han producido algunos casos de evacuaciones importantes (Cook et al. 1981; Cronin et al. 1998; Johnston et al. 2000; Stewart et al. 2006; Wilson & Cole 2007). Esto es principalmente debido a la peligrosidad que las caídas de ceniza volcánica representan para varios sectores de la sociedad (**sección 1.5.3**). Pero los casos específicos de evacuaciones náuticas ocurridas como consecuencia directa de caídas piroclásticas son extremadamente exiguos (p. ej., Carroll & Parco 1966; Moore et al. 1966) y poco estudiados.

En los últimos años, la Patagonia andina ha sido afectada por un número de fenómenos geo-ambientales, incluyendo distintos tipos de peligros volcánicos y otros no-volcánicos, los cuales han tenido efectos devastadores para las comunidades de la región. Estas situaciones de emergencia condujeron a la reiterada necesidad de poner en marcha numerosas acciones de respuesta por medios navales. Entre estos casos, se destacaron: (1) la erupción del volcán Hudson de 1991 (**sección 1.6.1**); (2) la erupción del volcán Chaitén de 2008 (**sección 1.6.2**); (3) la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 (**sección 1.6.3**); (4) la erupción del volcán Calbuco de 2015 (**sección 1.6.4**); y (5) una significativa tormenta de nieve y volcamiento de rocas que provocaron el aislamiento vial de Villa La Angostura durante el invierno de 2019 (**sección A5**). Estos cinco eventos han sido específicamente abordados como casos de estudio para la elaboración de este capítulo ya que, colectivamente, representan las primeras instancias relevantes de respuesta náutica a emergencias en Patagonia.

A pesar de que el transporte naval ha demostrado ser consistentemente una herramienta esencial para la gestión de desastres en la región, no todos los casos de estudio han sido completamente exitosos. De hecho, todas estas acciones de respuesta han mostrado deficiencias significativas, muchas de las cuales están relacionadas con el desconocimiento de ciertos aspectos inherentes a la región patagónica. Entre los fracasos más significativos sobresalen algunas evacuaciones injustificadas que ocurrieron en circunstancias no enteramente necesarias, un fenómeno que se conoce como *shadow-evacuations* (Zeigler et al. 1981; Baker 1991; Gladwin & Peacock 1997); o casos de órdenes e intentos de evacuación que no prosperaron, debido a la reluctancia de los residentes a abandonar sus granjas y hogares (Dash & Gladwin 2007; Haynes et al. 2009); e incluso algunos intentos de rescate infructuosos debido al fallo de las embarcaciones en presencia de ceniza volcánica, operativos realizados en condiciones de navegación sumamente riesgosas (Salgado et al. 2023).

Aun así, a la fecha, las acciones de respuesta naval en Patagonia continúan siendo operativos particularmente carentes de cualquier tipo de planificación.

2.1.2. Objetivos específicos

Con el fin de evaluar la eficacia de los sistemas de transporte naval como recurso válido para la respuesta a emergencias, en este capítulo se pretende:

- Identificar instancias recientes donde se haya implementado el transporte naval para evacuar o asistir poblaciones de Patagonia en ámbitos urbanos, rurales o en sitios de interés turístico.
- Elaborar una reconstrucción descriptiva y detallada de casos de estudio.
- Investigar posibles metodologías que permitan tipificar y evaluar este tipo de operativo particular.
- Sistematizar los casos de estudio, según las distintas fases que componen un operativo de respuesta a la emergencia.
- Cotejar los casos de estudio e identificar factores o problemáticas recurrentes que condicionen este tipo de operativo.
- Sugerir una serie de recomendaciones replicables, que permitan planificar futuras acciones de respuesta más eficaces, eficientes y seguras.

2.1.3. Metodologías específicas

Las metodologías aplicadas (**sección 1.3**) para el relevamiento, reconstrucción y evaluación de respuestas navales a la emergencia incluyeron:

- Visitas de reconocimiento a sitios afectados. Entre 2019 y 2020 se realizaron numerosas visitas de reconocimiento para observar los efectos de los distintos peligros que desencadenaran operativos de respuesta naval.
- Reuniones y entrevistas de investigación con partes afectadas. Entre 2019 y 2022, se entrevistó a un total de 52 personas (n: 52) pertenecientes a 24 entidades u organizaciones diferentes (n: 24) con distintos tipos de injerencia en los operativos de respuesta (*role-driven interviews*). En su amplia mayoría, las entrevistas se realizaron de forma presencial (en el sitio de los hechos o en el lugar de trabajo del informante) y continuadas por telecomunicaciones cuando fuera posible o necesario. Las entrevistas fueron diseñadas en carácter semi-estructurado. En términos generales, el esquema estandarizado y preestablecido de temáticas a consultar refirió a las siguientes variables de observación: (1) identificación y caracterización de los peligros o amenazas desencadenantes; (2) motivos principales por los cuales se decidió iniciar (o no) la acción de respuesta; (3) recursos navales implementados; (4) recursos humanos (*respondientes*) requeridos, si aplicara; (5) especificaciones respecto a los sitios de encuentro, partida, rutas náuticas, destino y permanencia de evacuados o asistidos; (6) perdurabilidad de los operativos; (7) procesos de retorno seguro, si aplicara; (8) cuantificación de personas, ganado, bienes y suministros transportados, y tasas de transporte diaria, semanal o mensual; (9) disponibilidad de planes de respuesta preexistentes; y (10) dificultades específicas surgidas antes, durante o después del proceso de respuesta.

- Consulta de fuentes complementarias. La información relevada por medio de las entrevistas fue complementada a partir de consultas de otras fuentes, como por ejemplo reportes técnicos inéditos o reconstrucciones de reportes de medios de comunicación locales y oficiales. Los datos de población y afluencia turística se obtuvieron a través de la Dirección Provincial de Estadísticas y Censos de la Provincia del Neuquén y del Censo Nacional del año 2010 ⁽¹⁾. Los datos viales se obtuvieron a través de Vialidad Nacional Argentina ^(2;3). Los datos meteorológicos se obtuvieron a partir de consultas con la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro ⁽⁴⁾.
- Sistematización de casos de estudio. La literatura científica sobre la gestión del riesgo de desastres no sugiere ningún tipo de estrategia o procedimiento para sistematizar, de forma integral, acciones de respuesta a la emergencia (Salgado et al. 2022). Aquí entonces se propone un nuevo modelo para tipificar este tipo de operativos según ocho funciones básicas de la respuesta a la emergencia, el cual se describe detalladamente en la **sección 2.3**.

⁽¹⁾ <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>

⁽²⁾ <https://www.argentina.gob.ar/obraspublicas/vialidad-nacional/sig-vial>

⁽³⁾ [https://transito.vialidad.gob.ar:8080/SelCE_WEB/variaciones temporales.html](https://transito.vialidad.gob.ar:8080/SelCE_WEB/variaciones_temporales.html)

⁽⁴⁾ <http://www.aic.gov.ar/sitio/home>

2.2. Casos de estudio – Introducción al Anexo A

Separadamente, en el **Anexo A**, se presenta una reconstrucción narrativa de un total de 19 casos de estudio. Estos casos abarcan todas las acciones de respuesta naval realizadas en comunidades costeras de Patagonia, en áreas rurales y otros sitios de interés turístico, como consecuencia de 5 eventos distintos que han sido descriptos con anterioridad (**sección 1.6.1 a 1.6.5**).

2.3. Sistematización de casos de estudio

Existe una multiplicidad de criterios disponibles para clasificar y categorizar los numerosos detalles que se atienden durante cada una de las fases de una respuesta (entre los más representativos, Quarantelli 1982; Leonard 1985; Southworth 1991; Vogt & Sorensen 1992; Tomsen et al. 2014). Sin embargo, la literatura sobre el manejo de emergencias y gestión de desastres no propone ninguna metodología que permita sistematizar de forma integral este tipo de acciones (Salgado et al. 2022). Esto se debe a que en cierta medida los criterios de clasificación dependen esencialmente del objeto de investigación planteado, pocas veces centrado en la sistematización y comparación de casos de estudio, y del nivel de detalle o alcance que este requiriera o permita

(Perry & Lindell 2004). Aquí se propone un nuevo modelo que permite tipificar distintos operativos náuticos para el manejo de emergencias, desde las fases de preparación hasta la recuperación (Salgado et al. 2022). Este modelo permite condensar y categorizar un gran volumen de datos cuantitativos y cualitativos en una tipología de ocho funciones básicas del manejo de emergencias. Las ocho funciones fueron definidas de la siguiente manera:

- *Tipo o clase de procedimiento* (basado en, pero no restringido a: Perry 1978, 1985, 1991; Leonard 1985; McLoughlin 1986; McCool et al. 2003; Lindell et al. 2006; Marrero et al. 2010; Tobin et al. 2013; Kolen & Helsloot 2014; Sawalha 2020; y referencias en los mismos).

- Razones específicas para iniciar (o cohibir) las distintas acciones de preparación/prevenición, mitigación, respuesta o recuperación (p.ej., Quarantelli 1980; Leonard 1985; Vogt & Sorensen 1992).

- Recursos de transporte naval puestos en efecto, incluyendo número, tipo y tamaño de buques; sitios portuarios involucrados para el embarque y desembarque de los evacuados, respondientes, animales o suministros movilizados; y especificaciones sobre las rutas náuticas emprendidas.

- Organizaciones, instituciones o entidades (si las hubiera) involucradas en el procedimiento y sus respectivas jurisdicciones; u otros recursos humanos involucrados.

- *Timing* del procedimiento (relativo al impacto del evento) y *extensión relativa* de la acción. Por ejemplo, para el caso de las evacuaciones, la cantidad de tiempo que se espera que los evacuados permanezcan fuera de sus residencias permanentes (p. ej., Tierney et al. 2002; Urbina & Wolshon 2003; Zimmerman et al. 2007).

- *Grado relativo de evacuación* (exclusivo para acciones de respuesta a la emergencia tipo *evacuativas*; Lindell et al. 2006; Hughey 2008; Haynes et al. 2009; Marrero et al. 2010), indicando el número o proporción de evacuados residentes, transientes o cabezas de ganado movilizados (Drabek 1995; Tobin et al. 2013; Wilson et al. 2012b). En casos de acciones *no-evacuativas*, también se detallan observaciones específicas respecto a los suministros o respondientes transportados (Haynes et al. 2009).

- Principales ventajas, logros, o resultados positivos alcanzados, referidos a la opción de operar por vías náuticas.

- Principales limitaciones, complejidades, obstáculos o causas de fracaso del operativo que hubieran surgido durante cada una de las fases del procedimiento (Vogt & Sorensen 1992).

Esta tipología ofrece un marco ideal para poder sintetizar, sistematizar y comparar procedimientos navales tan disímiles. Al presentar cada caso de estudio, función por función, ordenadamente juntos, pudieron reconocerse y caracterizarse (Staruss & Corbin 1990; Charmaz 2000; Glaser & Strauss 2017) los principales factores que recurrentemente influyeron sobre la eficiencia o eficacia de cada operativo.

	CASOS DE ESTUDIO	TIPO DE PROCEDIMIENTO	MOTIVO DE INICIACIÓN	RECURSOS NAVALES	ORGANISMOS INVOLUCRADOS	TIMING DE RESPUESTA	GRADO DE RESPUESTA	PRINCIPALES LOGROS & PROBLEMÁTICAS
HUDSON 1991	Evacuaciones y auxilio en alrededores del L. Gral. Carrera/ Buenos Aires (A 1.1)	Evacuación y asistencia rural (en parte naval) reactiva extraoficial/ organizada de poblaciones rurales	Efectos de ceniza en salud humana, animal, SIC (corto plazo); removilización eólica (medio a largo plazo)	Evacuaciones asistidas por un buque de servicio privado (ferry barcaza <i>El Pilchero</i>)	Extraoficial (corto plazo); organizada por agencias gub. y ONG de Chile (ONEMI, SAG, INDAP) y Argentina (largo plazo)	Rta sin-impacto de corto a largo término (incluso permanente)	Evacuaciones parciales a total: abandono de granjas	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial. Accesibilidad vial limitada e interrumpida por ceniza, nieve, lluvia y removilización eólica de ceniza; sin registros censales rurales; capacidad financiera particular y del mercado local limitadas.
CHAITÉN 2008	Evacuación de Chaitén (A 2.1)	Evacuación marítima preventiva oficial-forzada y total de residentes	Exposición a peligros proximales (zona de exclusión)	Varios buques de pasajeros de primera, de servicio y embarcaciones menores y deportivas oficiales (Guardacostas)	ONEMI; en asociación: FAC; Carabineros de Chile; agencias gub. y ONG	Rta pre- y sin-impacto de largo término	Evacuación total de ~5.000 habitantes hacia ciudades aledañas	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial y aumentando tasa de evacuación. Falta de planificación; impactos de ceniza en la navegación.
		Huida vehicular reactiva y extraoficial	Temor				Sin registros escritos	
		Asistencia marítima reactiva (mitigación) oficial-organizada	Situación de emergencia.					
	Evacuaciones y auxilio en Los Alerces (A 2.2)	Evacuación vehicular reactiva y extraoficial de residentes	Temor; sin necesidad de permanencia.	N/A	Extraoficial	Rta inmediata de largo término	Evacuación total, excluyendo personal esencial de gestión	Falta de planificación y organización.
Evacuación y asistencia naval de poblaciones rurales		Inaccesibilidad vial; disrupción de SIC.	Embarcaciones menores y deportivas oficiales	PN Los Alerces	Rta sin- a pos-impacto de largo término	Sin registros escritos de personas, animales o suministros movilizados	Falta de planificación; impactos de ceniza en la navegación.	
CORDÓN CAULLE 2011-2012	Evacuaciones vehiculares (A 3.1)	Evacuación y huida vehicular preventiva/ reactiva y oficial-forzada (Chile)	Exposición a peligros proximales (zona de exclusión).	N/A	ONEMI	Rta pre- y sin-impacto de corto término	Evacuación parcial de ~4.270 habitantes hacia zonas lindantes	N/I
		Evacuación y huida vehicular reactiva y extraoficial (VLA)	Temor; <i>shadow evacuation</i> (falta de indicación oficial); disrupción de SIC.	N/A	Extraoficial	Rta inmediata de corto a largo término	Evacuación parcial de ~5.500 habitantes (datos extraoficiales) hacia zonas lindantes	Falta de planificación y organización (comunicación); impactos de ceniza en vialidad; congestionamientos: tráfico de base intenso (temporada turística); cuellos de botella.
	Huida del Ref. de montaña <i>El Dormilón</i> (A 3.2)	Huida naval reactiva y extraoficial	Exposición.	Dos embarcaciones menores y deportivas particulares (RIBs)	Extraoficial	Rta inmediata de largo término	Evacuación total de nueve trabajadores hacia VLA	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial. Impactos de ceniza en la navegación.
	Evacuaciones y auxilio en el <i>Perilago</i> (A 3.3)	Intentos de rescate naval reactivo oficial-organizado de poblaciones rurales	Exposición; inaccesibilidad vial; disrupción de comunicaciones; vulnerabilidad de SIC.	Tres embarcaciones menores y deportivas oficiales (Guardacostas)	PNA (VLA); PN Nahuel Huapi	Intento de rta inmediata	Intento de evacuación total de varias poblaciones rurales, poco censado	Falta de planificación; comunicación inadecuada; criterio de iniciación inadecuado; impactos de ceniza en la navegación (incluyendo pérdidas totales).
		Asistencia naval social y rural (mitigación y recuperación) oficial-organizada de poblaciones rurale	Ídem anterior (A 3.3); reluctancia al abandono de granjas y hogares.	Un buque de servicio turístico privado (ferry barcaza <i>El Patagón</i>) y varias embarcaciones menores y deportivas oficiales (Guardacostas)	PNA (VLA); PN Nahuel Huapi y Los Arrayanes; CLER; una Cía. turística privada	Rta sin- a pos-impacto de medio a largo término	Sin registros escritos de personas, animales o suministros movilizados	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial. Falta de planificación de recuperación; sin registros censales de zona afectada; impactos de ceniza en la navegación.
	Varamiento en Pto. Blest (A 3.4)	Rescate naval organizado de personal aislado	Inaccesibilidad vial; varamiento sin necesidad de permanencia.	Buque de pasajeros de primera turístico privado (<i>Catamarán Victoria del Lago</i>)	Una Cía. turística privada	Rta sin- (refugio) o pos-impacto (evacuación) de largo término	Evacuación total de ocho trabajadores hacia Bariloche	Falta de planificación (para el refugio/ transporte alternativo en situación de emergencia); impactos de ceniza en la navegación. Notar: peor de los escenarios – potencial número de varados excesivamente mayor (durante temporadas turísticas o por habilitación de pernóctes).

Tabla 2.1 (parte 1). Sistematización de casos de estudio, según un modelo o tipología de funciones básicas del manejo de emergencias (Salgado et al. 2022). *N/A*: no aplica; *N/I*: no investigado; *PN*: Parques Nacionales; *PNA*: Prefectura Naval Argentina; *PC*: Protección Civil; *VLA*: Villa La Angostura; *FAC*: Fuerzas Armadas de Chile; *CLER*: Comité Local de Emergencia Rural del Departamento Los Lagos; *COE*: Comité de Emergencia; *SIC*: Sistemas de infraestructura crítica.

	CASOS DE ESTUDIO	TIPO DE PROCEDIMIENTO	MOTIVO DE INICIACIÓN	RECURSOS NAVALES	ORGANISMOS INVOLUCRADOS	TIMING DE RESPUESTA	GRADO DE RESPUESTA	PRINCIPALES LOGROS & PROBLEMÁTICAS
CORDÓN CAULLE 2011-2012	Evacuaciones y auxilio en el L. Trafal (A 3.5)	Intento de rescate naval reactivo oficial-organizado de poblaciones rurales (en L. Pichi Trafal)	Exposición riesgosa; inaccesibilidad vial; incomunicación; vulnerabilidad de SIC	Una embarcación menor y deportiva oficial de PN (tipo RIB) remolcada desde Secc. Lago Espejo Chico	PN Nahuel Huapi (Secc. Lago Espejo Chico); COE VLA	Intento de rta inmediata	Intento de evacuación total de ~2 poblaciones, poco censado; sin registros escritos	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial. Falta de planificación; comunicación inadecuada; falta de recursos navales disponibles en el sitio; impactos de ceniza en la navegación.
		Intento de rescate naval reactivo oficial-organizado de poblaciones rurales (desde Villa Trafal)	Exposición riesgosa; inaccesibilidad vial; incomunicación; vulnerabilidad de SIC	Una embarcación menor y deportiva oficial de PN (tipo RIB)	Sala de Situación de Trafal; en asociación: PC y PNA de VLA	Intento de rta inmediata	Intento de evacuación total de ~3 poblaciones, poco censado; sin registros escritos	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial. Falta de planificación; comunicación inadecuada; falta de recursos navales disponibles en el sitio; impactos de ceniza en la navegación.
		Asistencia naval social y rural, oficial-organizada, de poblaciones rurales	Ídem anteriores (A 3.5); reluctancia al abandono de granjas y hogares	Una embarcación menor y deportiva oficial de PN (tipo RIB)	Sala de Situación de Trafal; en asociación: CLER	Rta sin- a pos-impacto, de largo término	Sin registros escritos de personas, animales o suministros movilizad	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial. Falta de planificación de recuperación; falta de recursos navales disponibles en el sitio; impactos de ceniza en la navegación; pocos registros censales de zona afectada.
	Auxilio en alrededores del L. Lácar Nonthué (A 3.6; A 4.1)	Asistencia naval social y rural, oficial-organizada, de parajes	Disrupción de accesibilidad vial (circulación desaconsejada)	Una única embarcación menor y deportiva oficial (Guardacosta tipo RIB)	PNA (SMA); en asociación a PN Lanín y una Cía. turística	Rta sin- a pos-impacto, de largo (2011-2012) a corto término (2015)	Sin registros escritos de personas o suministros movilizad	Comunicación interorganizacional efectiva (2011-2012); aplicación de lecciones aprendidas (2015); transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial. Falta de planificación; impactos de ceniza en la navegación.
CALBUCO 2015	Riesgo de aislamiento en Pto. Canoa y alrededores (A 4.2)	N/A	Exposición riesgosa a peligros volcánicos proximales/distales	Flota disponible: Un buque de pasajeros de segunda y varias embarcaciones menores particulares (RIBs)	N/A	N/A	N/A	Falta de planificación (para el refugio/ transporte alternativo); impactos de ceniza en la navegación; removilización eólica de ceniza.
CRISIS GEO-METEOROLÓGICA (VLA) INVIERNO 2019	Evacuación nocturna de visitantes diurnos (A 5.1)	Huida naval reactiva oficial-organizada y de transientes	Accesibilidad vial limitada e interrumpida; sin posibilidad de refugio; disrupción de SIC	Tres buques de pasajeros de primera turística privados (<i>Modesta Victoria</i> y <i>Catamaranes Gran Victoria</i> y <i>Cau-Cau</i>)	Numerosas autoridades de Bariloche y VLA, con asistencia del sector turístico y PNA	Rta inmediata, de largo término	Evacuación parcial de ~800 transientes hacia Bariloche	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial; recursos turísticos disponibles para el manejo de emergencias (buques, guías de turismo para el manejo de grandes grupos, etc.). Falta de planificación; inadecuación de recursos navales (p. ej., para la navegación nocturna); manejo de grupos transientes.
	Movilización de residentes y transites varados (en catamarán) (A 5.2)	Evacuación naval reactiva/ protectora oficial-organizada de residentes y transientes	Accesibilidad vial limitada e interrumpida; sin posibilidad de refugio; disrupción de SIC	Dos buques de pasajeros de primera (<i>Catam. Patagonia Argentina</i> y <i>Futaleufú</i>) y un buque de servicio (ferry barcaza <i>El Patagón</i>) turísticos privados	Dos Cías. turísticas	Rta sin-impacto, de corto a largo término	Evac/moviliz. parcial de ~12.800 personas hacia Bariloche (primera semana) y Pto. Huemul (sig. 3 semanas)	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial; recursos turísticos disponibles para el manejo de emergencias. Falta de planificación; inadecuación de recursos navales (p. ej., falta de infraestructura portuaria apropiada); manejo de grupos transientes.
	Movilización de residentes y transites varados (en diferenciales) (A 5.3)	Evacuación naval reactiva/ protectora oficial-organizada de residentes y transientes	Accesibilidad vial limitada e interrumpida; sin posibilidad de refugio; disrupción de SIC	Unos ~diez buques de pasajeros de segunda y embarcaciones menores y deportivas (tipo RIBs) turísticos privados o particulares	Trabajadores privados del turismo; PN Nahuel Huapi y Los Arrayanes	Rta sin-impacto, de corto a largo término	Evac/moviliz. parcial de ~1.200 personas hacia Bariloche (primera semana); y ~2.400 hacia Pto. Huemul (sig. 3 semanas)	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial; recursos turísticos disponibles para el manejo de emergencias. Falta de planificación; inadecuación de recursos navales; manejo de grupos transientes.
	Continuación del transporte (A 5.4)	Movilización naval de retorno seguro y recuperación económica	Accesibilidad vial interrumpida; necesidad de retorno y recuperación	Ídem anteriores (A 5.1 & A 5.2)	Ídem anteriores (A 5.1 & A 5.2)	Rta pos-impacto, de corto término	Ídem anteriores (A 5.1 & A 5.2)	Transporte naval solventando problemáticas de accesibilidad vial y recesión en la actividad económica; recursos turísticos disponibles para el manejo de emergencias. Inadecuación de recursos navales; manejo de grupos transientes.

Tabla 2.1 (parte 2). Sistematización de casos de estudio, según un modelo o tipología de funciones básicas del manejo de emergencias (Salgado et al. 2022). *N/A*: no aplica; *N/I*: no investigado; *PN*: Parques Nacionales; *PNA*: Prefectura Naval Argentina; *PC*: Protección Civil; *VLA*: Villa La Angostura; *FAC*: Fuerzas Armadas de Chile; *CLER*: Comité Local de Emergencia Rural del Departamento Los Lagos; *COE*: Comité de Emergencia; *SIC*: Sistemas de infraestructura crítica.

2.4. Identificación de problemáticas recurrentes

A continuación, se enumeran y describen los principales aspectos que sistemáticamente influenciaron sobre la eficacia y eficiencia, o que directamente determinaron la posibilidad de gestionar situaciones de emergencia por medios navales. Muchos de estos aspectos están basados en la propuesta original de identificación de problemáticas para la gestión de desastres de Vogt & Sorensen (1992). Colectivamente, estas nociones ilustran la susceptibilidad y capacidad de los sistemas e instituciones de transporte naval de Patagonia para abordar diversos tipos de desastre por vías náuticas.

2.4.1. Aspectos asociados al peligro

Un primer aspecto que emerge de este análisis es la falta de una visión integrada de los distintos escenarios de peligro que amenazan a la región.

Patagonia andina está expuesta a un gran número y variedad de peligros (Chapron et al. 2006; Villarosa et al. 2009; 2013; Córdoba et al. 2015; Beigt et al. 2016; 2019; 2023) que pueden y han afectado a las comunidades de forma directa o indirecta (p. ej., interrumpiendo accesos viales; **sección 2.4.3**) suscitando la necesidad de iniciar acciones de respuesta por medios de transporte alternativos al vial. Un mejor entendimiento del tipo, intensidad, locación y cronología de los eventos contribuiría al proceso de toma de decisiones (Perry & Lindell 2004; Murray-Tuite & Wolshon 2013), ya que la peligrosidad que representan algunos de estos fenómenos aún permanece inexplorada.

Uno de los desafíos centrales está vinculado a la impronta *multi-hazard* (Sparks et al. 2013) que se manifiesta en numerosos casos de estudio. Muy comúnmente la planificación de respuestas a la emergencia suele focalizarse en un único tipo de peligro (Murray-Tuite & Wolshon 2013). Sin embargo, varios fenómenos pueden ocurrir de manera simultánea o secuencial, afectando de forma diferente a los distintos sectores de la sociedad, lo que determina la necesidad de implementar mecanismos de respuesta más complejos y mucho más específicos. Aún más, la ocurrencia de uno u otro evento dará lugar a distintas coyunturas de post evento (Lindell & Perry 1992; Perry & Lindell 2007; Phillips 2013), lo que implicaría atender a distintos tipos de limitaciones para garantizar el retorno seguro de los evacuados o la remediación de las zonas afectadas.

La relativa previsibilidad a corto plazo de algunos fenómenos como los huracanes o las inundaciones (Murray-Tuite & Wolshon 2013) permite poner en marcha acciones de respuesta más adecuadas (Peyravi et al. 2021) a lo que permiten otros tipos de eventos, como los sismos y tsunamis (Murray-Tuite & Wolshon 2013). La mayoría de las acciones de respuesta analizadas para Patagonia se desencadenaron como consecuencia de eventos que ocurrieron con poca (*short-notice events*) o ninguna (*no-notice events*) anticipación (Wilson-Goure et al. 2006; Noh et al. 2009). Responder a este tipo de situación requiere de acciones inmediatas y sin márgenes para la adaptación, lo que implica un nivel más alto de planificación. Este aspecto malogrado en Patagonia ha sido muy evidente a lo largo de todos los casos estudio, siendo que todas las respuestas iniciadas de forma apresurada durante o inmediatamente después del impacto (Tierney et al. 2002) resultaron

infructuosas o, mínimo, supusieron situaciones de riesgo adicional para los evacuados, tripulantes y respondientes a bordo de los buques.

Por su parte, también se han identificado otros casos de peligros naturales que han afectado a la región y que requirieron de respuestas navales a la emergencia, pero que no forman parte del presente trabajo de investigación (**Figura 2.2**). Los incendios forestales y de interfaz, por ejemplo, han sido ampliamente reconocidos afectando a las poblaciones de la región e interrumpiendo accesibilidades viales e incluso aéreas (Veblen et al. 2003; 2008; Veblen 2010). En marzo de 2021 varios focos de incendios se propagaron rápidamente por acción de los fuertes vientos regionales (**sección 1.5.2**) afectando una superficie de más de 28.000 hectáreas y numerosas localidades de la *Comarca Andina* (SNMF 2021). En diciembre del mismo año otro incendio afectó una región aledaña a los Lagos Steffen y Martin, al suroeste de la provincia de Río Negro (SNMF 2021; 2022). En ambas situaciones, y a causa a las interrupciones en los accesos terrestres, se debieron emplear recursos navales para evacuar a de cientos de residentes, facilitar las operaciones de asistencia de pobladores afectados y sostener las acciones de combate contra el fuego. Más recientemente, los incendios ocurridos en la región del Brazo Tristeza del Lago Nahuel Huapi a principios de 2024 nuevamente requirieron del servicio de los recursos náuticos disponibles, debido a la inaccesibilidad del área afectada (**Figura 1.13**). Finalmente es importante señalar que el riesgo de incendios en la Patagonia andina parece tender al aumento, debido al incremento de las temperaturas máximas en la región, la frecuencia de ignición por rayos y un desmedido crecimiento urbano (Kitzberger et al. 1997; Holz & Veblen 2011; Veblen et al. 2011; SAyDS 2014).



Figura 2.2. Ejemplos de disrupción de accesos viales en la Patagonia andina, requiriendo de acciones de respuesta naval a la emergencia. A la izquierda, caída de rocas sobre la RN 40 en las proximidades de Pto. Arauco (06/06/2020). Arriba a la derecha, flujo de lodo y colapso de la calzada de la RN 231 en las proximidades al Paso Internacional Cardenal Samoré (03/05/2019). Fotos cortesía de Vialidad Nacional Argentina. Abajo a la derecha, operativos de lucha contra los incendios forestales en la región del Brazo Tristeza del Lago Nahuel Huapi (febrero de 2024).

2.4.2. Aspectos asociados a accesibilidades territoriales

Otro aspecto crítico está asociado a la falta de conocimientos sobre las características de exposición y vulnerabilidad de las *accesibilidades territoriales* de Patagonia.

El término *accesibilidad territorial* refiere a las capacidades para alcanzar ciertos sitios, personas o recursos con mayor o menor grado de facilidad (D'Ercole & Metzger 2009). Naturalmente, la accesibilidad territorial representa un componente fundamental en la gestión de desastres ya que posibilita, limita o incluso motiva cualquier acción de *preparación/prevenición, mitigación, respuesta o recuperación* que requieran de cierta movilidad (D'Ercole & Metzger 2009; Utasse et al. 2016; Defossez et al. 2017; Leone et al. 2019). En situaciones de accesibilidad territorial limitada, el sitio de impacto del peligro será un factor crítico a hora de decidir si iniciar o no una acción de respuesta (p. ej., Hughey 2008; Tomsen et al. 2014; Leone et al. 2019; y los numerosos ejemplos descriptos en el **Anexo A**). Justamente, Patagonia andina es una región que se caracteriza por exhibir accesibilidades territoriales esencialmente limitadas (debido a su contexto geográfico montañoso) y expuestas a los efectos de distintos tipos de peligros naturales (dada la vastedad de territorio que estas redes de transporte ocupan) (**sección 1.1**). Numerosas ciudades, comunidades rurales y sitios turísticos de la Patagonia disponen de escasas, si no es que únicamente una sola vía de acceso terrestre. Incluso existen varios sitios que, al carecer de conexiones viales, sólo pueden ser accedidos por medios navales (**Tabla 1.2**).

Al examinar algunos componentes del manejo de la emergencia, como: (1) los tipos de procedimientos; (2) los motivos de iniciación de la respuesta; y (3) los principales logros o problemáticas que surgieron para cada caso (**Tabla 2.1**) aparece que la limitación y/o interrupción de las accesibilidades han constituido un factor crítico para el manejo de desastres. En Chile, por ejemplo, la erupción del Chaitén de 2008 motivó la evacuación en masa de la totalidad de los habitantes de Chaitén, una pequeña ciudad portuaria emplazada en la Bahía de Chaitén sobre la Carretera Austral. Unos ~5.000 habitantes abandonaron la localidad por vías marítimas justo antes de quedar ésta devastada por flujos de lahares compuestos (**sección A2.1**), abatiendo de forma casi inmediata la capacidad portuaria de la ciudad (**sección 3.3.5**). Al otro lado de la cordillera, el transporte fluvio-lacustre permitió a las autoridades locales que permanecieron en el Parque Nacional Los Alerces sostener numerosos operativos de asistencia rural para varios de los pobladores que habitan zonas del Parque únicamente accesibles por medios navales (**sección A2.2**). De forma análoga, las erupciones subsiguientes de los volcanes Cordón Caulle (2011-2012) y Calbuco (2015) suscitaron numerosos y diversos operativos de respuesta que, con mayor o menor grado de éxito, procuraban rescatar, evacuar o asistir a pobladores y animales ubicados en sitios de difícil acceso (**sección A3.2 - A3.6; sección A4.1 - A4.2**).

Otra problemática está asociada a la falta de desarrollo de infraestructura y recursos navales en sitios propensos al aislamiento que posibiliten responder a situaciones de emergencia por este medio particular, lo que incluye el desarrollo de instalaciones portuarias en sitios estratégicos, el acceso a embarcaciones adecuadas para tales fines, la disponibilidad de recursos humanos, el preestablecer de vías náuticas de escape u otro tipo de infraestructura que posibilite alternativas de respuesta no-evacuativa (p. ej., la toma de refugio).

Un claro ejemplo de lo primero lo representa el aislamiento de Villa La Angostura durante el invierno de 2019, y la falta de buques y puertos adecuados para trasladar transientes y residentes por vías lacustres (**sección A5.2; sección A5.3**). Dadas la persistencia en la disrupción de los accesos viales y la dificultad de navegar hasta Bariloche, la ruta de evacuación naval debió ser rápidamente modificada para desembarcar en Pto. Huemul, una bahía natural ubicada en el sureste del Lago Nahuel Huapi (**Figura 1.13**). Esto significó acortar fuertemente las distancias implicadas para la evacuación y aumentar la frecuencia (o *tasa* de evacuación) diaria de los catamaranes. Pero debido a la falta de un puerto apropiado que posibilite el atracado de grandes embarcaciones en Pto. Huemul, se integró el uso del ferry-barcaza *El Patagón* (**Tabla 1.1**), un buque de servicio de Villa La Angostura, a modo de muelle flotante improvisado que permitiera el desembarco de los evacuados desde los catamaranes a tierra firme (**Figura 2.3**).

Una vez solucionado el faltante de infraestructura en el dominio terrestre de Pto. Huemul, se hizo evidente también la falta de conectividad entre la costa del lago y las redes de transporte vial. El tramo que une Pto. Huemul con la RN 40 era un camino infranqueable para el paso vehicular, con lo que los evacuados debían realizar una caminata cuesta arriba de casi un kilómetro de longitud, con equipaje a cuestas y bajo condiciones meteorológicas extremas (**Figura 2.3**). Una semana después se emprendieron las obras necesarias para permitir el acceso de vehículos hasta el lago, facilitando la evacuación de las personas (**sección A5.4**).



Figura 2.3. Evacuación de turistas y residentes varados en Villa La Angostura durante el invierno de 2019. A la izquierda, el Catamarán Patagonia Argentina y el ferry-barcaza El Patagón, asistiendo al embarco y desembarco de personas en Pto. Huemul. A la derecha, personas movilizándose por el camino de tierra que une Pto. Huemul y la Ruta Nacional 40. Fotos cortesía de Carlos Tavalla.

Un ejemplo de lo segundo lo representa la situación actual de acomodo en Pto. Blest (**Tabla 1.2**), un famoso destino turístico en el extremo suroeste del Lago Nahuel Huapi, accesible sólo por vías náuticas (**Figura 1.13**) y visitado por decenas de miles de personas al año. Durante la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012, y al momento del día en que inició de la caída de ceniza volcánica sobre el lago, los visitantes diurnos de Pto. Blest ya se encontraban de regreso en Bariloche. Por esta fortuna, la interrupción del tráfico lacustre solamente resultó en el varamiento de los ocho trabajadores con permanencia en el sitio (**sección A3.4**). Ahora bien, Pto. Blest puede albergar hasta 650 visitas diurnas en simultáneo, en adición al pernocte de otros 50 visitantes en sus instalaciones hoteleras. En este contexto, la ocurrencia de futuros eventos que pudieran afectar el sitio o su acceso naval podría significar la necesidad de evacuar o refugiar a un número considerablemente más abultado de personas. Similarmente, la evacuación nocturna de 2019 de unos 800 visitantes diurnos varados en Villa La Angostura hacia Bariloche se inició, justamente, debido a la imposibilidad de refugiar a semejante grupo de personas en una localidad con una ocupación turística completa y una total disrupción de casi todos los servicios de infraestructura crítica en la ciudad (**sección A5.1**).

Un escenario de riesgo de disrupción de accesibilidad territorial análogo se da en Pto. Canoa (**Tabla 1.2**; **Figura 1.14**) y en los asentamientos costeros que se encuentran alrededor de los lagos Huechulafquen y Epulafquen (**sección A4.2**). Si bien aquí la erupción del volcán Calbuco de 2015 no motivó ningún tipo de operativo de respuesta naval, la persistente caída y removilización eólica de la ceniza volcánica sí produjeron interrupciones significativas en el tráfico vehicular de la región (**Figura 2.4**).



Figura 2.4. Removilización eólica de ceniza en Pto. Canoa, semanas después de la erupción del volcán Calbuco de 2015. Cortesía de *Catamarán José Julián*.



Figura 2.5. Vista del Catamarán José Julián y estratovolcán Lanín de fondo desde Pto. Canoa. Foto cortesía de *Catamarán José Julián*.

Estos antecedentes con consecuencias discretas podrían agravarse en caso de ocurrir durante temporadas estivales, cuando el flujo de visitantes en un sitio con una sola vía de acceso terrestre (**Figura 1.14**) se incrementa sustancialmente. Además, la región y sus accesibilidades enfrentan una amenaza adicional derivada de los peligros volcánicos proximales asociados a la actividad del estratovolcán Lanín (**sección 1.5.1**), situado a tan solo 12 km de distancia de Pto. Canoa (**Figura 2.5**).

Si bien no forman parte de este estudio, en la Patagonia andina existen muchos otros sitios costeros que enfrentan limitaciones de accesibilidad territorial y que carecen de la infraestructura naval necesaria para dar respuesta adecuada en caso de emergencia. Por ejemplo, en las costas sur del lago Nahuel Huapi se encuentra la Península de San Pedro (**Figura 1.13**), una comuna suburbana situada aproximadamente a unos 20 km de la ciudad de Bariloche cuyo acceso se limita a un único camino pavimentado. La península no cuenta con instalaciones portuarias significativas que posibiliten una evacuación por medios alternativos al terrestre en caso de posibles futuras emergencias.

2.4.3. Aspectos organizacionales

La carencia de coordinación de muchas de las instituciones relacionadas con la gestión de desastres de la Patagonia andina representa otro desafío recurrente.

Las problemáticas *organizacionales* (Sorensen & Mileti 1987) abarcan cualquier tipo de limitación de los alcances o capacidades de las instituciones para hacer frente a una situación. Vogt & Sorensen (1992) distinguen dos tipos principales de problemáticas organizacionales. Por un lado, aquellas que ocurren de forma inherente a cada institución (problemáticas *intra-organizacionales*). Y por otro, aquellas que ocurren por la falta de articulación entre las numerosas instituciones que tengan cierta injerencia en la gestión de desastres de una región, o por la falta de coordinación entre las distintas jurisdicciones de una misma institución (problemáticas *inter-organizacionales*). Lógicamente, cualquier acción de respuesta se verá inmensamente fortalecida si se sustenta en una buena coordinación dentro y entre las instituciones, sean estas formales o extraoficiales (Dawson 1993; Neal 1993; Cronin et al. 2004; Alexander 2007; King 2008).

Lógicamente, una buena coordinación dentro y entre las instituciones, sean estas formales o extraoficiales, favorecerá la capacidad de implementación efectiva de cualquier acción de respuesta a la emergencia (Dawson 1993; Neal 1993; Cronin et al. 2004; Alexander 2007; King 2008).

Problemáticas inter-organizacionales

Un aspecto crítico fue la evidente falta de delimitaciones preestablecidas con respecto a los alcances de cada institución o jurisdicción (**Tabla 2.1**). Este tipo de desafío es común en instituciones que operan simultáneamente en múltiples y diversos ámbitos (Cross 2001). En la región de la Patagonia, esto ha sido especialmente evidente en el caso de las áreas naturales protegidas, donde se observa una superposición recurrente entre entidades como la Administración de Parques Nacionales, la Prefectura Naval Argentina, Protección Civil, Vialidad Nacional, los Comités de Emergencia y el sector privado. Un escenario similar aplica para los distintos niveles de autoridad nacional, provincial, municipal o de áreas protegidas de una misma institución.

En la Patagonia, la economía se centra principalmente en el turismo, lo que genera otro aspecto organizativo relevante. En la actualidad, la mayor capacidad de recursos de transporte naval se encuentra concentrada en el sector turístico privado (**sección 1.4.1**). Como resultado, varias empresas relacionadas con el turismo lacustre se vieron involucradas inesperadamente en numerosas acciones de respuesta, proporcionando embarcaciones, infraestructura y recursos

humanos para mitigar, responder y recuperar sitios afectados (**Tabla 2.1**). Sin embargo, hasta la fecha, no se ha establecido ningún tipo de conexión formal que articule oficialmente las capacidades del sector turístico privado con las necesidades de recursos navales de las instituciones oficiales de la Patagonia.

Problemáticas intra-organizacionales

A lo largo de todo este trabajo de investigación, una de las principales dificultades que ha obstaculizado cualquier intento de recopilación de datos (**sección 1.3**) ha sido la persistente ausencia de memorias, informes y registros escritos que documenten experiencias pasadas. Al igual que para muchos otros sectores de la sociedad (p. ej., Outes et al. 2015), el ámbito náutico no ha logrado establecer, a lo largo de todas estas experiencias pasadas, algún tipo de sistema que permita recopilar y capitalizar los conocimientos producidos durante estos eventos (**Figura 2.6**).

Entre las 26 instituciones consultadas para la realización del presente trabajo, absolutamente ninguna (0%; n: 26) afirmó haber podido documentar por escrito algún registro sobre los impactos (**sección 3.2; sección 3.3**) o las acciones de respuesta (**Anexo A**) y mitigación de daños (**sección 3.5**) producidos durante las sucesivas situaciones de emergencia.

Las instituciones señalaron que el uso habitual de registrar sucesos diarios en documentos escritos (como libros de salidas, registros de órdenes, bitácoras de operaciones) se interrumpió justamente a causa del desenfreno que generaron las situaciones de emergencia (**sección 4.1**). Muchos de los conocimientos quedaron entonces capitalizados solamente como bagaje o experticia de algunos actores involucrados en cada situación.

En adición, en algunas instituciones vinculadas a la gestión de desastres en la Patagonia andina, es habitual que muchos agentes no permanezcan en una misma jurisdicción de manera constante. Esta rotación de personal, junto con la falta de documentación escrita y protocolos, contribuye a la pérdida sistemática de conocimientos y experiencias acumuladas, ya que con cada recambio de personal se diluyen valiosas lecciones aprendidas de situaciones pasadas.

02 Jun 11	10:30	76	COSTA	COSTA GONZALEZ	BLANCHI	DEL LAGO	INFERNO	17:30
02 Jun 11	11:00	34	BRANCHI	SHEFFIELD	ALLI	DEL LAGO	PEREZ	
02 Jun 11	12:30	32	COSTA	COSTA GONZALEZ	BLANCHI	DEL LAGO	INFERNO	17:30
02 Jun 11	14:00	37	BRANCHI	SHEFFIELD	ALLI	DEL LAGO	SALA	19:00
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas Volcan	PURHUT			
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas	DEL PURHUT			
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS	Por Cenizas				
02 Jun 11		SIN	SALIDAS					

En otros casos también se hizo evidente una profunda falta de disponibilidad de datos censales de las poblaciones expuestas. Este tipo de información permite a las autoridades ubicar y dimensionar a las poblaciones bajo amenaza de forma mucho más rápida y precisa, lo que posibilita responder de manera mucho más rápida y eficiente. Este ha sido el caso particular del sector turístico (**sección 2.4.4**) y rural de la Patagonia andina, donde se practican actividades como la ganadería extensiva con restricciones asociadas a la conservación de áreas protegidas (Anselmi et al. 2012; Outes et al. 2015; PNNH 2019; **secciones A3.3; A3.5; A3.6**).

2.4.4. Aspectos demográficos

En la región existe una marcada pluralidad de aspectos demográficos o poblacionales que han impactado de manera negativa en el desarrollo de las respuestas navales.

Los *aspectos demográficos* son un conjunto de atributos preexistentes que caracterizan a las personas y las comunidades bajo amenaza, como los son los factores psicológicos, socioeconómicos, culturales, demográficos, etc. Estos elementos son ampliamente reconocidos como determinantes para el manejo de cualquier tipo de emergencia (Kroll-Smith & Drabek 1988; Chakraborty et al. 2005; Bolin & Kurtz 2018; Bakhshian & Martinez-Pastor 2023; Depari & Lindell 2023). En Patagonia estos aspectos presentan contrastes no solamente dentro y entre las comunidades afectadas, sino que también exhiben variaciones espaciales y estacionales muy marcadas a lo largo del año.

Uno de los principales desafíos que enfrenta la gestión de desastres en la región radica en la complejidad de abordar situaciones de manera simultánea en áreas urbanas grandes y pequeñas, zonas rurales y destinos turísticos. Estos desafíos surgen principalmente debido a dos factores: primero, la relación inversa entre el grado de exposición y la capacidad de resiliencia de las diferentes localidades; y segundo, el nivel de especificidad de las necesidades que emergen en cada caso particular (Cross 2001). Lidar simultáneamente y de manera eficiente con esta diversidad de necesidades impone una demanda significativa de recursos navales a las instituciones pertinentes.

Estas problemáticas se hicieron particularmente evidentes durante la caída de ceniza volcánica de 2011 que afectó a la región noroeste del Lago Nahuel Huapi (**Figura 1.13**). Este evento generó una serie de necesidades muy distintas entre los residentes del área urbana de Villa La Angostura, los habitantes de barrios periféricos, los visitantes en sitios turísticos remotos y los pobladores de zonas rurales. Por ejemplo, mientras las autoridades debatían sobre la mejor estrategia para atender las necesidades urgentes en el Perilago del Nahuel Huapi (**sección A3.2; A3.3**), aproximadamente la mitad de los residentes del área urbana (en cifras no oficiales) auto evacuaban la ciudad en vehículos particulares. Esto último sin ser estrictamente necesario ni conveniente, en medio de condiciones pésimas para el manejo vehicular y sin ningún tipo de indicación o control oficial (**sección A3.1**).

Particularmente, la gestión de desastres en destinos de interés turístico es una labor especialmente compleja. El manejo de grandes grupos de visitantes suele ser desafiante ya que estos están a menudo menos preparados para afrontar una evacuación debido a: (1) escasa

familiaridad con el área afectada; (2) bajos niveles de confianza en las autoridades locales; (3) carencia de vínculos familiares o amistosos que permitan movilizarse en grupos o tomar refugio; (4) posibles barreras idiomáticas; etc. (Matyas et al. 2011; Aliperti et al. 2020; Wachtel et al. 2021).

Por ejemplo, muchos agentes vinculados a las evacuaciones de Villa La Angostura durante el invierno de 2019 (**sección A5**) manifestaron enfáticamente la dificultad operativa que representaba movilizar en las embarcaciones el abultado equipaje que acarreaban los evacuados transientes (**Figura 2.7**). Éste obstaculizaba los procedimientos de embarque y desembarque y



Figura 2.7. Ejemplo de la movilización en catamaranes de turistas y residentes varados en Villa La Angostura durante el invierno de 2019. Fotos cortesía de Carlos Tavalla.

acotaba la capacidad de transporte de las embarcaciones mayores, reduciendo las tasas de evacuación daría (**sección A5.1; A5.2**). En el caso de los *transportes diferenciales* el equipaje amarrado en cubierta provocaba una disminución considerable de la estabilidad y navegabilidad de las embarcaciones, dificultando los intentos de traslado de larga distancia por aguas abiertas (**sección A5.3**).

El acarreo de bolsos, mochilas y valijas también significó un esfuerzo adicional para los evacuados al tener que cargarlos a pie cuesta arriba por el tramo terrestre que unía Pto. Huemul y la Ruta Nacional 40 durante los primeros días de evacuación (**Figura 2.3**).

La planificación de respuestas en estas regiones enfrenta un desafío adicional, debido a la vasta y poco documentada (**sección 2.4.3**) variabilidad temporal de cantidad de personas que ocupan un área determinada. Esta variabilidad, que puede ser estacional, semanal, diaria e incluso horaria, es consecuencia de la inmensa afluencia de visitantes en la región, y de sus movilizaciones o concentraciones en lugares y momentos específicos. Esto requiere de una gran capacidad adaptativa por parte de las instituciones, para poder garantizar respuestas efectivas en cualquier escenario posible (Murray-Tuite & Wolshon 2013). En este sentido, un mismo evento puede requerir acciones completamente diferentes según la hora del día, la semana o estación del año en que ocurra, como se ilustró anteriormente en el caso de Pto. Blest durante la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 (**sección 2.4.2; sección A3.4**). Además, el momento de ocurrencia de un determinado fenómeno también puede definir aspectos críticos como: (1) la disponibilidad de recursos humanos y náuticos (buques), que se incrementa significativamente durante la temporada estival; (2) las condiciones, por ejemplo meteorológicas, para navegar; (3); el nivel de tráfico de base; (4) el nivel de ocupación de determinados servicios turísticos y sociales; y (5) el grado de dependencia de las personas de servicios de infraestructura crítica, ajenos al transporte, que posibiliten o limiten la toma de refugio. Este último aspecto ha sido fundamental al momento de iniciar o cohibir intentos de evacuación naval durante las sucesivas crisis de 2008, 2011-2012, 2015 e incluso 2019 (**Tabla 2.1**).

2.4.5. Aspectos de vulnerabilidad de los sistemas de transporte naval

Para decidir movilizar a las personas en situaciones de desastre, es necesario verificar antes el cumplimiento de ciertas condiciones mínimas de seguridad, que garanticen tanto el funcionamiento del recurso de transporte implementado como la integridad de las personas movilizadas (Godschalk 2003; Valentine 2003; Holguin-Veras et al. 2007), una condición no validada para ninguno de los casos de respuesta a los eventos de caídas piroclásticas (**Tabla 2.1**).

Los sistemas de transporte naval de Patagonia han demostrado ser, paradójicamente, causa de éxito y fracaso de varios de los operativos emprendidos (**Figura 2.8**). Por un lado, brindaron un medio alternativo para la evacuación, asistencia y recuperación de sitios con accesos viales limitados (**secciones A1.1; A2.1; A2.2; A3.2; A3.3; A3.4; A3.5; A5.4**) o interrumpidos a causa del evento eruptivo (**secciones A3.6; A4.1; A5**). Sin embargo, los impactos de la ceniza volcánica sobre la funcionalidad de los buques y los puertos han obstaculizado prácticamente todo intento de respuesta naval estudiado (**Tabla 2.1**). Esto ha significado la exposición innecesaria de

respondientes y evacuados a situaciones de riesgo extremo, mucho mayor al que hubiera significado la toma de refugio *in-situ*. Un ejemplo distintivo de esto está ilustrado por los precipitados y fallidos intentos de rescate de pobladores de áreas rurales durante la erupción del Cordón Caulle de 2011 (sección A.3.3.1).

Estos antecedentes han puesto de manifiesto la profunda falta de conocimientos acerca de las características de vulnerabilidad de los sistemas de transporte naval frente a caídas de ceniza volcánica, fundamentando así la composición del capítulo próximo (sección 3).

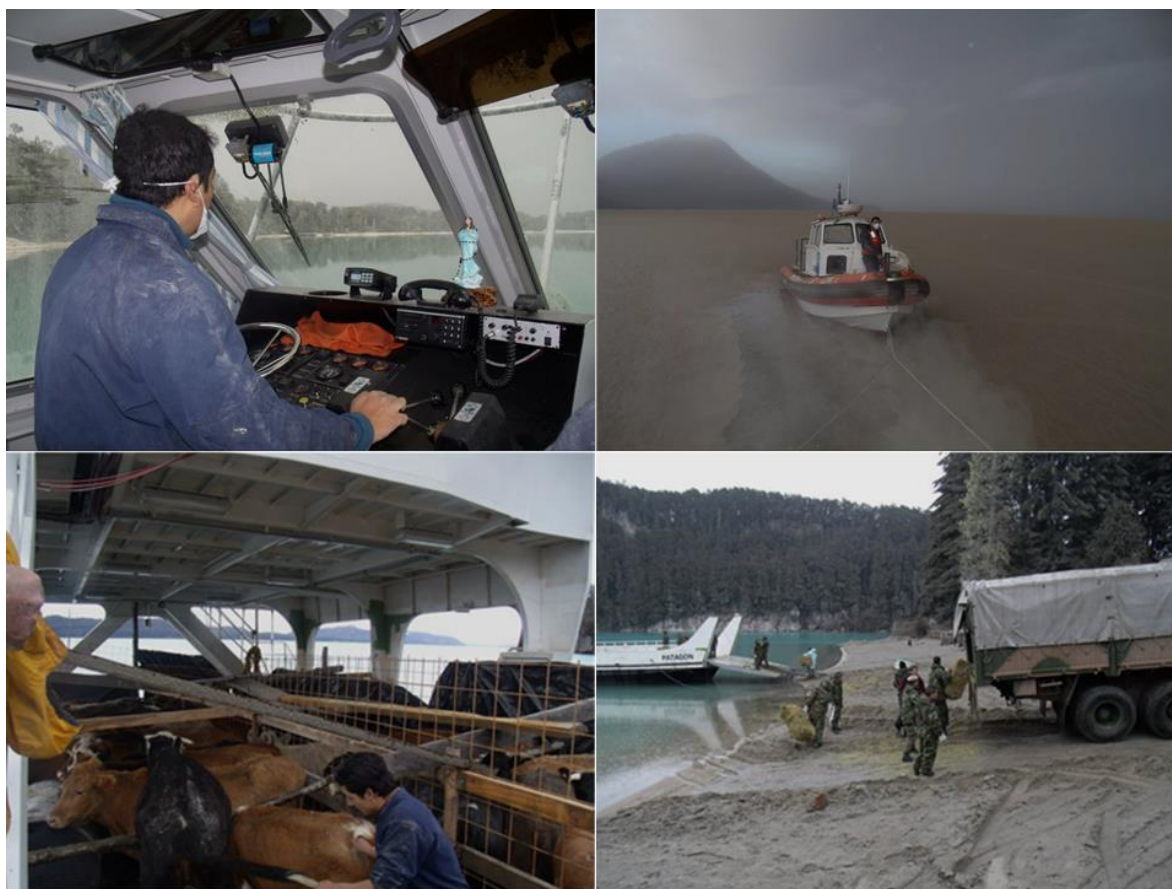


Figura 2.8. Ejemplos de acciones de respuesta naval a la emergencia durante la erupción del Cordón Caulle de junio de 2011. Arriba, intentos inmediatos e infructuosos de rescate de pobladores del Perilago. Abajo, ejemplos de acciones logradas de asistencia social y rural en el Perilago, iniciadas unos días después de la erupción. Fotos cortesía de Prefectura Naval Argentina.

2.5. Discusión

Es importante destacar que este trabajo no establece como objetivo estricto producir planes concretos de respuesta naval por caídas piroclásticas u otros tipos de peligro de origen natural. Esta labor específica es parte del funcionamiento de los organismos de manejo de emergencias de los distintos niveles de gobierno (Ley 27.287) y escapa a los alcances planteados para este trabajo de

investigación. El análisis aquí presentado busca en cambio identificar problemáticas recurrentes que interfieran con la posibilidad de gestionar emergencias por medios navales, sugiriendo e incluso resolviendo (**sección 3**) el abordaje de algunos principios fundamentales de la emergencia para la planificación de futuras eventualidades. De todos modos, basar una planificación de contingencias exclusivamente en el análisis de experiencias pasadas continúa siendo una aspiración deficiente. Esto es, primero, por la baja probabilidad de que dos eventos concretos afecten de mismo modo un mismo sitio y requieran de respuestas equivalentes (Murray-Tuite & Wolshon 2013). Y en segundo lugar, por la tendencia de cambios ineludibles que experimentan las poblaciones expuestas, sus actividades y el ambiente en el que habitan (Romero Lankao & Qin 2011).

En Patagonia andina, estas limitantes están notablemente representadas por el continuo y desmedido crecimiento de la actividad turística y el desarrollo urbano poco planificado, especialmente en áreas costeras de la región, lo que supone una presión significativa sobre los recursos navales existentes.

Muchas de las incertidumbres y limitaciones planteadas anteriormente pueden abordarse parcialmente mediante modelados y simulaciones de emergencias y crisis disponibles en la literatura sobre manejo de emergencias y gestión de desastres (Santos & Aguirre 2004; Schadschneider et al. 2010; Zockaie et al. 2014). Las numerosas técnicas existentes para modelar y simular evacuaciones en masa permiten abordar eficazmente este tipo de incógnitas en diversos escenarios planteados. Esto posibilita establecer marcos para la propuesta de mejoras específicas en el desarrollo de planes y metodologías de evacuación, tendientes a la reducción del riesgo de desastres en la Patagonia andina y otras regiones de características similares. Esta investigación en particular aporta información cuantitativa, cualitativa y validada empíricamente para abordar este tipo de modelados y simulaciones de evacuaciones náuticas, para producir sugerencias más específicas y mejor justificadas.

Es relevante destacar que en la región no existen antecedentes de evaluaciones de gestión de contingencias basadas en este tipo de técnicas, lo que convierte esta contribución en el primer paso hacia esa dirección. Particularmente, la Patagonia andina representa un escenario ideal para este tipo de investigación, debido a la multiplicidad de peligros que amenazan la región (**sección 1.5**) y la complejidad de las poblaciones y elementos expuestos (**sección 2.4**).

Se estima que, a escalas globales, las acciones de respuesta a contingencias causadas por peligros naturales se están volviendo cada vez más frecuentes (Sparks 2003). Naturalmente, se espera que la Patagonia continúe esta misma tendencia, incluso de manera acrecentada, debido al particular crecimiento desmedido y poco planificado de las urbanizaciones y el turismo. En las últimas décadas se han registrado numerosísimos casos similares, pero de menor envergadura, a los analizados en este capítulo. Si bien no forman parte del presente trabajo de investigación, todos ellos han requerido del transporte naval como medio de respuesta a diversas contingencias (**sección 2.4.1**). Extrapolar este tipo de aprendizaje a otras clases de amenaza o regiones suele ser una tarea compleja y limitada (Marrero et al. 2010; Romero Lankao & Qin 2011; Murray-Tuite & Wolshon 2013), pero este antecedente ofrece, de todos modos, algunas perspectivas elementales para

incorporar adecuadamente el recurso naval a los sistemas de gestión de desastres y manejo de emergencias.

2.6. Recomendaciones

Por lo general, cualquier experiencia de gestión deficiente de los desastres conlleva una pérdida de confianza por parte de las comunidades hacia las autoridades, y al mismo tiempo, afecta la capacidad de toma de decisión de los gestores frente a nuevas situaciones de riesgo (Tobin & Whiteford 2002; Perry & Lindell 2004; Bourque et al. 2006).

Sorprendentemente, todos estos antecedentes de fallos sistemáticos en la gestión de desastres de Patagonia andina (**sección 2.4**) no han catalizado ningún tipo de mejora en la planificación de las respuestas navales, y este recurso de transporte alternativo continúa siendo no considerado como una herramienta crucial para la reducción del riesgo de desastres en la región.

Con el propósito de avanzar en esta dirección, a continuación, se enumeran algunos de los principios fundamentales del manejo de emergencias (Lindell & Perry 2007; y referencias en el mismo) que deberían ser adecuadamente abordados para la planificación de respuestas navales seguras en caso de futuras eventualidades.

- La identificación y caracterización de todos los peligros (volcánicos y no-volcánicos) que amenazan a la región y que puedan suscitar acciones de respuesta naval, lo que conduzca al desarrollo de mapas de peligrosidad específicos, con consideraciones especiales a los posibles escenarios de tipo *multi-hazard* (p. ej., Sparks et al. 2013).
- La evaluación integral de las accesibilidades territoriales, tanto viales como navales, con el fin de identificar áreas con alto riesgo de aislamiento y grupos con movilidad reducida (Urbina & Wolshon 2003) que puedan necesitar servicios de transporte alternativos. En la Patagonia andina, esta situación se destaca especialmente en sitios costeros insulares y remotos.
- El censo continuo de las distintas poblaciones en riesgo, con el fin de dimensionar la posible extensión de las acciones de respuesta, y los recursos necesarios para ello (buques, infraestructura portuaria, recursos humanos, suministros de emergencia, etc.). En la Patagonia andina, esta condición es particularmente crítica para: (1) sitios de interés turístico, con inmensas variaciones intra-anales de afluencia de visitantes; (2) zonas rurales y de reserva natural, con escaso registro de las actividades ganaderas extensivas; y (3) ámbitos urbanos, con crecimientos desmedidos y poco planificados.
- La caracterización demográfica de las poblaciones expuestas, que permita identificar factores de vulnerabilidad críticos (y sus inmensas variabilidades temporales y espaciales) que condicionen la prontitud de iniciar o cohibir una acción

de respuesta naval. En la Patagonia andina, estas cuestiones han sido particularmente relevantes para los grupos transientes y para los pobladores de áreas rurales.

- Es importante destacar que, hasta aquí, debido a la multiplicidad de factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad de las personas y los elementos bajo amenaza, la gestión del riesgo de desastres en la Patagonia andina requiere de contemplar escenarios tipo peor de los casos (*worst-case scenarios*; Golding & Kaspersen 1988), lo que permitiría atender en simultáneo a todos estos factores de incertidumbre. Sin embargo, este enfoque suele significar una presión considerable sobre la capacidad de las instituciones involucradas y sobre los recursos de transporte disponibles.
- La integración y acople del transporte naval a las redes viales e infraestructuras críticas (hospitales, aeropuertos, centros de evacuados) disponibles para el manejo de emergencias, lo que permita formalizar el uso de los recursos náuticos en planes integrales de respuesta. Esto implica especialmente la determinación y preparación de: (1) puntos de encuentro; (2) sitios adecuados para el embarque y desembarque; (3) rutas náuticas convenientes, y reparos necesarios para operar en situaciones extraordinarias (como la navegación nocturna, en condiciones adversas o por vías no convencionales); (4) buques adecuados para la respuesta, y reparos necesarios para el transporte de cargas extraordinarias en buques de pasajeros (como cabezas de ganado, suministros para la emergencia rural, suministros básicos y de emergencia, grandes grupos de turistas y equipaje); (5) los recursos humanos necesarios para el manejo de la emergencia, incluyendo a los agentes que excepcionalmente pudieran quedar involucrados en este tipo de situaciones (como guías de turismo o prestadores de servicios turísticos lacustres); (6) sitios estratégicos e infraestructura para el refugio o albergue de los evacuados; y (7) los recursos necesarios para establecer condiciones mínimas de seguridad para el retorno de los evacuados.
- El acople inter e intra-organizacional de todas las partes involucradas en la gestión del riesgo, el manejo de la emergencia y los prestadores de servicios de transporte naval de Patagonia. Esto implica, por ejemplo, preestablecer alcances, responsabilidades, canales de comunicación y medios de registro adecuados entre tomadores de decisiones, respondientes, instituciones científicas, el sector turístico privados y las poblaciones expuestas.
- La investigación sobre las características de vulnerabilidad de los sistemas de transporte naval frente a caídas de ceniza volcánica (y otros peligros asociados) y sobre las medidas de prevención, mitigación y remediación de impactos en buques, puertos y la navegación (**sección 3**).

Capítulo 2 – Anexo A

Casos de estudio: acciones de respuesta naval en situación de emergencia

En las siguientes secciones se resumen de forma narrativa y detallada cada una de las múltiples acciones de respuesta a la emergencia que se realizaron por vías de transporte naval, a causa de cinco eventos *geo-meteorológicos* recientes que afectaron la Patagónica andina. Todos estos procedimientos se encuentran resumidos de manera sistemática en la **Tabla 2.1 (sección 2.3)**.

A1. LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN HUDSON DE 1991

A1.1. Evacuaciones y auxilio en los alrededores del Lago General Carrera/Buenos Aires

Las caídas piroclásticas de la erupción del volcán Hudson, una de las más significativas del siglo XX (**sección 1.6.1**), fueron causantes de un fenómeno extenso y perdurable de evacuación masiva de personas y ganado. Las evacuaciones de las estancias afectadas iniciaron de forma casi inmediata a la erupción, y perduraron por varios meses e incluso años, significando en algunos casos el abandono definitivo de algunos sitios.

Wilson et al. (2012b) investigaron este fenómeno en tres zonas agrícolas distintas de Argentina y Chile: (1) en las inmediaciones del valle del Río Ibáñez (un área afectada por hasta >500 mm de ceniza; Naranjo et al. 1993; Scasso et al. 1994), donde predomina la ganadería de pastoreo de baja y media intensidad de ovejas y algunos bovinos; (2) en los alrededores del Lago General Carrera/Buenos Aires, incluyendo las zonas aledañas a las localidades de Puerto Ibáñez, Chile Chico, Los Antiguos y Perito Moreno (un área afectada por ~50 - 120 mm de ceniza; Naranjo et al. 1993; Scasso et al. 1994), donde la irrigación de los valles sustenta la actividad agricultura pastoril y hortícola intensiva; y (3) en la extensa zona esteparia extra-Andina, extendida hasta la costa Atlántica (una vasta región afectada por ~1 - 50 mm de ceniza; Naranjo et al. 1993; Scasso et al. 1994), donde predomina la ganadería pastoril extensiva de ovino de baja intensidad (**Figura 1.11**).

En toda esta región, los granjeros comenzaron a evacuar por su propia cuenta en las primeras horas o días posteriores a la erupción, dirigiéndose hacia los centros urbanos más cercanos como Puerto Ibáñez, Chile Chico, Los Antiguos, Perito Moreno, Puerto San Julián y Tres Cerros. Posteriormente, se trasladaron hacia otras regiones no afectadas por la ceniza en busca de empleo.

En los valles irrigados alrededor del lago, donde los efectos sobre la actividad mixta de agricultura y horticultura no fueron tan devastadores, las evacuaciones comenzaron un poco más tarde, semanas después de la erupción, pero se prolongaron durante varios años más (Wilson et al. 2009a).

En el corto plazo (los primeros tres meses), las evacuaciones estuvieron principalmente motivadas por los riesgos para la salud humana y animal, así como por el impacto de la ceniza en la actividad ganadera (Valdivia 1993; Rubin et al. 1994; Wilson et al. 2009a). Esta situación se vio agravada por las condiciones precarias preexistentes, marcadas por períodos de sequía y bajos precios de la lana y los productos cárnicos. En el mediano y largo plazo, la continua removilización eólica de los depósitos de ceniza fina exacerbó los problemas de salud humana y animal, y aumentó los impactos de la caída inicial en la agricultura. Esto provocó el abandono de las pocas granjas que aún permanecían ocupadas y dificultó el retorno de aquellos que habían sido evacuados (Wilson et al. 2010a).

La duración de estas evacuaciones (o extensión relativa, medida el tiempo que los evacuados deben permanecer fuera de sus residencias permanentes) varió considerablemente en toda la región. Hubo casos de productores renuentes a abandonar sus granjas y animales, para verificar el estado de las estancias. Por otro lado, también hubo casos de abandono definitivo, especialmente cuando se constató que la actividad ganadera ovina ya no era una opción viable. En los alrededores del Lago General Carrera/Buenos Aires, el abandono de las áreas rurales se prolongó desde uno hasta más de cuatro años después de finalizada la emisión de ceniza volcánica (Wilson et al. 2012b). Por ejemplo, en Puerto Ibáñez, se observó una disminución significativa de la población, pasando de unos ~4.000 habitantes en 1991, a unos ~2.700 en 2001, un nivel que se ha mantenido estable desde entonces (INE 1992, 2002, 2017).

El manejo del ganado estuvo considerablemente obstaculizado por varios factores, incluyendo la falta de registros censales de las cabezas de ganado, las condiciones previas de adversidad para la actividad, la capacidad económica limitada del mercado local y la disponibilidad limitada de pasturas para reubicar a los animales.

En los alrededores del lago, así como en el valle del Río Ibáñez, la limitada accesibilidad vial para el ingreso de camiones a las zonas afectadas (**Figura 1.11**), las intensas precipitaciones y nevadas, y la constante removilización eólica de la ceniza fina se convirtieron en una problemática crítica para el transporte del ganado. Particularmente, la evacuación de bovinos de Puerto Ibáñez estuvo asistida por el antiguo ferry-barcaza *El Pilchero* (un trasbordador con capacidad para 70 pasajeros que conectaba de forma regular las localidades de Puerto Ibáñez y Chile Chico) a través del Lago General Carrera/Buenos Aires hacia Chile Chico. Luego se concluía el traslado en camiones hasta la localidad de Los Antiguos, donde los controles fronterizos entre Argentina y Chile habían sido flexibilizados para favorecer la evacuación de personas y ganado. Lamentablemente, no existen registros escritos que permitan mesurar estos operativos náuticos. Justamente, estas problemáticas de accesibilidad vial limitada e interrumpida resultaron en la imposibilidad de evacuar o asistir a los animales, lo que ocasionó pérdidas significativas de cabezas de ganado. Tras la reapertura de los

caminos, fue posible intensificar los operativos de asistencia rural, principalmente el transporte de alimentos, así como el transporte de animales para la venta.

Inicialmente, todos los procesos de evacuación se llevaron a cabo de manera espontánea y autónoma. Sin embargo, posteriormente, la evacuación y el auxilio rural fueron organizados y respaldados por numerosas agencias gubernamentales y no gubernamentales de Chile y Argentina (**Tabla 2.1**). La decisión de evacuar el ganado siempre estuvo en manos de los productores, quienes la tomaron en función de sus capacidades financieras, lo que resultó en que la mayoría no pudiera llevar a cabo la evacuación (Wilson et al. 2012b).

Por otro lado, durante la erupción más reciente del volcán Hudson en 2011 (VEI: 1-2; Delgado et al. 2014; **sección 1.6.1**) la Oficina Nacional de Emergencias de Chile, ONEMI (actualmente el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, SENAPRED; <https://web.senapred.cl/>) informó que para el 27 de octubre, dos días después de iniciada la erupción, unas 128 personas debieron ser evacuadas del área ubicada dentro de un radio de 45 km alrededor del volcán. Para el 30 de octubre del mismo año, el total de evacuados había ascendido a 140 personas en total.

A2. LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN CHAITÉN DE 2008

A2.1. Evacuación marítima de Chaitén

En Chile, la erupción del volcán Chaitén provocó la evacuación de todos los habitantes de la localidad homónima de Chaitén (p. ej., De la Barrera et al. 2011; Major & Lara 2013; Tomsen et al. 2014; Mandujano et al. 2015), una pequeña comuna y capital de la provincia de Palena en la Región de Los Lagos, ubicada a tan solo 10 km del volcán. La erupción, que comenzó en la madrugada del 2 de mayo de 2008 después de miles de años de inactividad y con pocas señales precursoras detectadas, estuvo marcada por una fase explosiva que duró diez días (**sección 1.6.2**).

Al día siguiente, desde las primeras horas, la localidad de Chaitén inició una evacuación preventiva por vías marítimas, ante posibles flujos piroclásticos, lahares o una intensificación de la erupción, hacia localidades como Castro, Quellón (ubicadas en la costa oriental del Archipiélago de Chiloé) y Puerto Montt (frente al *Seno de Reloncaví*). Estas movilizaciones se llevaron a cabo principalmente a bordo de buques oficiales de la Armada y el Ejército de Chile, los cuales también contribuyeron luego con la movilización de respondientes y suministros de emergencia (**Figura A.1**). Al mismo tiempo, muchas otras personas abandonaron la localidad por sus propios medios a través de la *Carretera Austral* (o Ruta 7, la única vía de ingreso y salida Chaitén), dirigiéndose a localidades del interior del país como Futaleufú y Palena (cerca del límite internacional con Argentina), o más al sur, hacia Coyhaique. Para la noche del mismo día, aproximadamente el 80% de la población local ya había evacuada.

En simultáneo, muchos residentes se autoevacuaron en vehículos particulares hacia Argentina a través del Paso Internacional Río Futaleufú (**Figura 1.12**). Este paso fronterizo es uno de



Figura A.1. Evacuación marítima de los pobladores de Chaitén durante la erupción de mayo de 2008 (CC BY 3.0 CL, Gobierno de Chile).

los principales de la región y comunica por vía terrestre las localidades argentinas de Esquel, Trevelin y Paraje Los Cipreses (Provincia de Chubut) con la localidad chilena de Futaleufú (Región de Los Lagos). Durante la emergencia, las autoridades de gendarmería argentina flexibilizaron el ingreso de personas al país, sin llevar un registro oficial del número de evacuados. En ese momento, el COE de Esquel calculaba el ingreso de más de 1.300 personas, además de algunos animales de corral, hacia Argentina.

Debido a la reluctancia de algunos residentes a abandonar la ciudad, las autoridades gubernamentales interpusieron un recurso de protección ante la *Corte de Apelaciones de Puerto Montt* para evacuar a los pobladores que permanecían en la zona de exclusión de 50 km de radio del volcán (Lara 2009). Para el 6 de mayo, cuatro días después del inicio de la erupción, la localidad quedó completamente desierta, incluyendo al personal técnico y militar que se asentó en la isla Los Desertores. Durante las semanas siguientes, muchas áreas rurales fueron también evacuadas (tanto personas como ganado), debido a las intensas caídas piroclásticas que afectaron la región (Wilson et al. 2012b). El 12 de mayo, diez días después del inicio de la erupción y seis días después de completada la evacuación, se produjo una crecida del Río Blanco, que atraviesa el centro poblado, anegando y depositando material piroclástico sobre gran parte de la ciudad (**sección 1.6.2**).

La exitosa evacuación marítima de los casi cinco mil habitantes de Chaitén (4.625 residentes) se vio parcialmente obstaculizada por la pérdida de visibilidad atmosférica (**sección 3.2.5**) y el

impacto de inmensos volúmenes de *pumice rafts* (**sección 3.2.6** y **sección 3.2.7**) sobre el funcionamiento de las embarcaciones (Salgado et al. 2023).

A2.2. Evacuaciones y auxilio en Los Alerces

En Argentina, el Parque y Reserva Nacional Los Alerces (**Figura 1.12**), ubicado a unos 85 km al este del volcán, fue afectado por caídas piroclásticas de espesores muy variados (Watt et al. 2009; Alfano et al. 2011). Esto provocó diversos efectos como: (1) incidentes aislados en la navegación de los lagos del parque; (2) la evacuación inmediata en vehículos particulares de personal y visitantes turísticos; y (3) la necesidad de brindar asistencia a pobladores rurales a través de vías náuticas.

El Parque y Reserva Nacional Los Alerces comprende una cadena de lagos de origen glaciario que se conectan por cursos de agua cortos, y ofrece a sus visitantes un gran número de hospedajes y campamentos que se asientan sobre sus costas orientales (**Figura 1.12**). Estos sitios pueden ser accedidos únicamente a través de la Ruta Provincial 71, un camino de ripio que conduce hacia las localidades de Cholila hacia el norte y Trevelin y Esquel hacia el sur (Provincia de Chubut). Hasta el año 2008, al menos, no existían asentamientos permanentes en el parque (INDEC 2010), con la excepción de algunas pequeñas poblaciones rurales en los alrededores.

Durante la mañana del 2 de mayo, ya iniciada la caída de ceniza volcánica en el parque, dos embarcaciones menores y deportivas (**Tabla 1.1**) se aventuraron en una hazaña arriesgada en el Lago Menéndez, navegando hacia el oeste para observar de cerca la pluma eruptiva desde el agua. En su marcha, ambas embarcaciones experimentaron desperfectos en su funcionamiento al intentar abrirse paso entre la caída piroclástica y una muy fina capa de pómez formada en la superficie del lago. Una de estas embarcaciones, un bote semirrígido fueraborda utilizado habitualmente como embarcación de apoyo para excursiones turísticas perdió su funcionalidad cerca de la Isla Grande (**Figura 1.12**). Los tripulantes a bordo debieron desarmar la cobertura del motor marítimo para poder despejarlo de ceniza acumulada y ponerlo en marcha nuevamente. A pesar de estos contratiempos, ambas tripulaciones lograron retornar al puerto de forma segura y abandonar rápidamente las inmediaciones del Parque en vehículos, dirigiéndose hacia las localidades vecinas de Trevelin y Esquel.

A lo largo de ese mismo primer día, todo el personal y los visitantes turísticos que se encontraban dentro del parque evacuaron el área en vehículos hacia las localidades vecinas. En muchos casos, las movilizaciones continuaron a corto, medio y largo plazo hacia otras áreas más alejadas, no afectadas por la caída piroclástica, ya que todas las actividades recreativas en los lagos de la región permanecieron completamente interrumpidas por casi 6 meses consecutivos, hasta la siguiente temporada estival.

Desde el inicio de la erupción del Chaitén y durante todo este periodo de inactividad turística, las pocas autoridades que permanecieron en Los Alerces mantuvieron varias navegaciones esporádicas de asistencia, con el objetivo de brindar ayuda a los pobladores que habitan los alrededores de los lagos del parque, en áreas inaccesibles por otros medios que no sean navales. Estos pobladores permanecieron refugiados *in-situ* durante todo tiempo que duró la caída de ceniza

volcánica. Lamentable, no existen registros escritos que detallen el número de salidas o la cantidad de suministros, personas (evacuados o respondientes) y animales transportados a bordo de las embarcaciones oficiales disponibles en el sitio.

A3. LA ERUPCIÓN DEL CORDÓN CAULLE DE 2011-2012

A3.1. Evacuaciones vehiculares

A3.1.1. En Chile: en la Región de Los Ríos y Los Lagos

El mismo 4 de junio, poco antes del inicio de la erupción, la ONEMI declaró una alerta roja para varias comunas de la Región de los Ríos (Comunas de Futurono, Lago Ranco y Río Bueno) y Los Lagos (Comuna de Puyehue) (ONEMI 2011a) debido a un aumento significativo de la actividad sísmica en las cercanías del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (SERNAGEOMIN 2011a).

A partir de esta medida, la misma ONEMI determinó la evacuación preventiva y obligatoria de unos 700 habitantes de los sectores de Pucará, Pichico, Los Venados, Contrafuerte y El Zapallo, en la Región de Los Ríos; y de El Retiro, Anticura, El Caulle, Forestal Comaco y Anticura Pajaritos, en la Región de Los Lagos (ONEMI 2011a). En similitud a lo sucedido en Chaitén durante la crisis de 2008, este incremento en los niveles de alerta y la evacuación preventiva ordenada por ONEMI pudo ser alcanzada gracias a los acuerdos de transferencia de información existentes entre la ONEMI y el SERNAGEOMIN (Donovan et al. 2023).

En ese contexto, también se cerró el Paso Internacional Cardenal Samoré, de donde se evacuó al personal aduanero. Además, se despacharon tres camiones hacia las comunas de la Región de Los Ríos con suministros para paliar la posible emergencia social, incluyendo colchonetas, frazadas, generadores, etc. (ONEMI 2011a). Más tarde, una vez iniciada la erupción del Cordón Caulle (**sección 2.3.3**) el radio de exclusión se amplió en ambas regiones, aumentando el número de personas a evacuar a un total de 3.700 residentes (ONEMI 2011b).

Para el 19 de junio, dos semanas después de iniciada la erupción, muchas de las condiciones de exclusión y evacuación ya habían sido levantadas (ONEMI 2011c) debido a la declinación de la actividad explosiva y la reducción del riesgo de peligros proximales en ambas regiones (SERNAGEOMIN 2011b), lo que posibilitó el retorno seguro de muchos residentes a sus hogares (ONEMI 2011c).

Durante los 16 días en que se mantuvo esta situación, el número de personas en condición de evacuación alcanzó a los 4.270 residentes, provenientes de 21 localidades en total. De estos, cerca de 700 permanecieron refugiados en albergues habilitados en las localidades de menor riesgo, mientras que la gran mayoría se trasladó a casas de familiares. Para todas estas personas se dispuso de la entrega de un conjunto de ayudas, que incluyeron alimentos, ropa de abrigo, ropa de cama y, con posterioridad, asistencia económica (ONEMI 2011c).

A3.1.2. En Argentina: en Villa La Angostura

Desde el mismo 4 de junio, al comenzar la masiva caída piroclástica que sorprendió a la población de Villa La Angostura, y durante las semanas siguientes, muchos turistas y de la localidad abandonaron la ciudad de manera espontánea en sus vehículos particulares (Protección Civil de Villa La Angostura, *com. pers.*). Una de las principales razones detrás de estas evacuaciones improvisadas fue la falta de recomendaciones e instrucciones oficiales por parte de las autoridades, junto con el temor y la incertidumbre que se propagaron durante los primeros momentos de la emergencia volcánica (Outes et al. 2015; Wilson et al. 2013; Donovan et al. 2023).

A lo largo del mes de junio, las sucesivas e intensas caídas de ceniza volcánica generaron un severo y prolongado impacto en los servicios de infraestructura crítica de la localidad. Esto incluyó cortes en el suministro de energía eléctrica interrupciones en la provisión de agua potable, colapsos de techos de edificaciones por la acumulación de ceniza y nieve, la obturación de desagotes pluviales en plena temporada invernal de precipitaciones, etc. (Wilson et al. 2013). La actividad económica regional se vio profundamente afectada por el cierre de comercios, la falta de accesibilidad por el cierre de caminos y la fuerte caída de la demanda turística que perduró por varios meses. La continua caída de ceniza y la resuspensión constante de los depósitos por el viento aumentaron la preocupación y la ansiedad entre los residentes sobre los riesgos para la salud a corto y largo plazo (Outes et al. 2015).

En conjunto, todos estos factores llevaron a muchos residentes a tomar la decisión de abandonar la localidad, lo que resultó en un aumento en el número de auto-evacuados durante las semanas y meses que siguieron a la erupción.

Las autoridades locales estimaron, de manera extraoficial, que aproximadamente la mitad de la población estable de Villa La Angostura abandonó temporalmente la localidad por sus propios medios durante el primer mes de erupción, lo que representa unos ~5.500 auto-evacuados. Lamentablemente, no existe ningún registro escrito o estimación precisa que documente este fenómeno, ni el proceso de retorno de los residentes a la localidad (Salgado et al. 2022).

Durante todo este periodo, las movilizaciones vehiculares se vieron fuertemente obstaculizadas debido a la caída y removilización de ceniza volcánica, lo que resultó en la formación de superficies resbalosas, el sepultamiento de marcas y señalizaciones viales, una disminución marcada de la visibilidad atmosférica, etc. (Wilson et al. 2013; Blake et al. 2016, 2017a, 2017b, 2018). Estos problemas fueron especialmente evidentes en la Ruta Nacional 231 y en numerosos tramos de la Ruta Nacional 40 entre las localidades de Bariloche (Provincia de Río Negro) y Piedra del Águila (Provincia del Neuquén). Estos caminos representan las principales vías de acceso vehicular de Villa La Angostura, desde y hacia Bariloche, Neuquén, el Paso Internacional Cardenal Samoré y el resto del país (Salgado et al. 2022). Además, la removilización fluvial de inmensos volúmenes de tefra, asociada a eventos de precipitaciones intensas, también causó graves impactos en la accesibilidad vial (**Figura 2.2**), incluso en áreas distales del volcán (Córdoba et al. 2015; Salgado et al. 2023).

A3.2. Huida del refugio de montaña *El Dormilón*

El primer caso concreto de evacuación lacustre registrado debido a la erupción del Cordón Caulle corresponde a la huida de los 9 voluntarios (7 socios del Club Andino de Villa La Angostura y 2 contratados) que se encontraban trabajando en la construcción del refugio de montaña *El Dormilón* (**Figura 1.13**).

El refugio se encuentra ubicado en la cumbre del cerro homónimo, el *Cerro Dormilón*, a una altura de 1.400 msnm. Para acceder al sendero de montaña que conduce al refugio, es necesario cruzar el Lago Nahuel Huapi, ya sea desde Villa La Angostura o desde las numerosas bajadas de lancha cercanas al Paso Cardenal Samoré, hasta el inicio del sendero en el *Camping Florencia* ubicado en la orilla sur del *Brazo Rincón*. Originalmente construido en 1933, este refugio fue el primer refugio de montaña de uso civil en Argentina. Sin embargo, con el paso del tiempo cayó en desuso, hasta que en 1998 un grupo de voluntarios del Club Andino de Villa La Angostura emprendió su reacondicionamiento. Esto incluyó desarmar la antigua edificación, que estaba a punto de ser demolida por motivos de seguridad, para proceder con la reconstrucción del nuevo edificio.

La misma tarde del 4 de junio, los trabajadores se encontraban en el sitio para finalizar la obra civil del refugio. Al iniciarse la erupción del volcán, ubicado a tan solo 40 km de distancia, el grupo de trabajadores inició un apresurado descenso a pie, improvisando tapabocas con gorras, pañuelos y remeras debido a la fuerte irritación que provocaba en ojos y garganta la cada vez más intensa caída de ceniza volcánica.

Al llegar a las costas del lago en el *Camping Florencia*, donde se encontraban amarradas las dos embarcaciones utilizadas para acceder al refugio, la visibilidad en la atmósfera y el agua había disminuido drásticamente, debido a la presencia de ceniza en el aire y en la superficie del agua. Después de varios intentos para poner en marcha los motores, los trabajadores emprendieron el lento retorno hacia Villa La Angostura en condiciones pésimas para la navegación y en medio de una extraordinaria actividad eléctrica en la atmósfera sobre el lago.

En numerosas ocasiones, la funcionalidad de los motores fuera de borda se interrumpió en plena navegación, debido a la ingesta de ceniza volcánica (**sección 3.2.6**), lo que requirió el desarme, limpieza y puesta en arranque de los motores. Al completar su arribo a Villa La Angostura esa misma tarde, las inmensas caídas de ceniza volcánica que hostigaron la huida casi habían colmado con fragmentos pumíceos gruesos las cubiertas abiertas de las embarcaciones.

Finalmente, el nuevo refugio de troncos canteados *El Dormilón* terminó siendo reinaugurado al año siguiente, el 31 de marzo de 2012.

A3.3. Evacuaciones y auxilio en el *Perilago*

A pesar de la prolongada actividad precursora (**sección 1.6.3**) la erupción y caída piroclástica del Cordón Caulle tomó por sorpresa a muchas autoridades, gestores, respondientes, residentes y pobladores de la región norte del Parque Nacional Nahuel Huapi. Como resultado, la caída de ceniza volcánica generó una serie de acciones de respuesta naval completamente improvisadas y con un

grado de éxito bastante limitado (**Tabla 2.1**), especialmente en la región del *Perilago* del Nahuel Huapi.

El *Perilago* es una extensa zona rural ubicada a lo largo del margen oeste del lago y habitada de forma dispersa por numerosas familias y pobladores (PNNH 2018). Originalmente, las principales actividades productivas que se desarrollaban en este paraje incluían la agricultura y la ganadería de tipo extensiva con amplias restricciones, ya que toda la región se encuentra dentro de las jurisdicciones de Parques Nacionales (Anselmi et al. 2012; PNNH 2018). El *Perilago* es un área que se caracteriza por presentar un muy alto grado de aislamiento territorial ya no existe ninguna vía de acceso terrestre desde otros centros urbanos. Los pobladores de la región dependen entonces de embarcaciones propias, o de la asistencia que proveen autoridades locales como Prefectura Naval Argentina y Parques Nacionales, para acceder al *Perilago*, abastecerse de suministros básicos, acceder a servicios de salud y educativos, y sostener la comercialización de productos a pequeña escala.

Incluso antes de la erupción del Cordón Caulle de 2011, las autoridades locales ya habían identificado grandes deficiencias en los servicios de infraestructura crítica de las poblaciones del *Perilago* (Anselmi et al. 2012). Estas problemáticas incluían, por ejemplo, numerosas edificaciones precarias, sistemas de comunicación limitados, suministro de energía y acceso a fuentes de agua potable endebles y, particularmente, recursos de transporte naval muy deficientes, como embarcaciones pequeñas y en mal estado.

Todas estas características extremas de vulnerabilidad en el *Perilago* fueron consideradas como críticamente insuficientes para la toma de refugio *in-situ* por parte de las autoridades locales, y motivaron muchas de las acciones de respuesta reactivas que se describen a continuación.

A3.3.1. Intentos de rescate de pobladores

Con conocimiento de la situación de exposición y extrema vulnerabilidad de los pobladores del *Perilago*, el mismo 4 de junio las autoridades lacustres con sede en Villa La Angostura iniciaron de inmediato varios intentos de rescate de los pobladores rurales, los cuales desafortunadamente resultaron infructuosos.

Poco antes de que comenzara la caída más intensa de ceniza volcánica en la ciudad, una primera partida compuesta por dos oficiales a bordo de un guardacosta (**Tabla 1.1**) emprendió un primer intento de rescate. Zarpando desde el Pto. Modesta Victoria (**Tabla 1.2**) con rumbo hacia *Bahía Colorado* en el *Perilago* (**Figura 1.13**) la tripulación se encontró con la intensa caída piroclástica, lo que provocó una falla casi inmediata en el sistema de navegación de la embarcación (**Figura A.2**). En medio de condiciones extremadamente desfavorables para la navegación, incluyendo dificultades para respirar, la irritación de los ojos y la garganta, una visibilidad casi nula tanto en el aire como en el agua y una estruendosa actividad eléctrica sobre el lago, la tripulación logró reiniciar la embarcación y continuar la marcha. Sin embargo, el guardacosta continuó experimentando numerosas fallas de forma intermitente.



Figura A.2. Primer intento de rescate de pobladores del Perilago del Nahuel Huapi. Fotos cortesía de Prefectura Naval Argentina.

Al llegar a la costa oeste del lago, sin conocimiento respecto a su ubicación exacta debido a la falta de equipamiento de geolocalización preparado para este operativo, los oficiales dirigieron el guardacosta a gran velocidad directamente contra la costa, con el objetivo de encallarla sobre los inmensos depósitos de tefra que cubrían playa, y evitar maniobras adicionales por temor a nuevos fallos. A partir de allí, la embarcación no pudo volver a ponerse en marcha debido a un fallo total y definitivo del sistema computarizado y centralizado de navegación y comunicación (**sección 3.2.4**).

Luego de investigar y descartar posibles daños en los sistemas de propulsión de la lancha (**sección 3.2.7**) y de retirar parte de la pesada carga de tefra acumulada en la cubierta (**sección 3.2.1**) la embarcación fue nuevamente lanzada al agua para remar cerca de la costa en busca del muelle y la residencia de la familia a la que se pretendía evacuar. Una vez allí, a unos 250 m del sitio de arribo original, el guardacosta inoperativo fue amarrado (**Figura A.2**) y la tripulación debió tomar refugio en la residencia familiar para pasar la primera noche. Afortunadamente, no existieron interrupciones o fallos en los sistemas de comunicación radial o telefónica, lo que permitió informar del incidente a las autoridades y familiares en Villa La Angostura. Tiempo después, mejoradas mínimamente las condiciones para la navegación, la tripulación varada en el Perilago y el guardacosta inoperativo pudieron ser remolcados de regreso a la ciudad por otra embarcación (**Figura A.2**).

Esa misma tarde, al tomar conocimiento del incidente ocurrido con la primera embarcación, las autoridades lacustres en Villa La Angostura iniciaron una segunda salida hacia el Perilago, en un intento también infructuoso de rescate de la tripulación varada. Sin embargo, esta segunda embarcación también experimentó fallos críticos al fundirse repentinamente el motor marítimo (**sección 3.2.6**) navegando en las proximidades de Pto. Quetrihué (**Tabla 1.2**), en el famoso destino turístico del Bosque de Arrayanes (**Figura 1.13**). Ante esta situación, la tripulación tuvo que amarrar el guardacosta en el muelle y refugiarse durante la noche en la casilla del celador de las instalaciones turísticas del lugar.

Al tiempo después, una vez mejoradas las condiciones relativas para navegar en el lago, una tercera comitiva logró asistir y evacuar de regreso a Villa La Angostura a las tripulaciones varadas. Esta tercera embarcación, un RIB de Parques Nacionales (**Tabla 1.1**), resultó ser inesperadamente resiliente a los efectos de la presencia de ceniza en el agua (**sección 3.2.6**).

A3.3.2. Acciones de asistencia social y rural

Con el transcurso de las semanas, todos estos intentos de rescate de los pobladores del Perilago fueron gradualmente reemplazados por estrategias de respuesta más adecuadas y mejor organizadas.

En los días posteriores al comienzo de la erupción una vez que las condiciones para la navegación mejoraron mínimamente, las autoridades lacustres en Villa La Angostura reanudaron los esfuerzos por asistir a los pobladores rurales varados en el Perilago. Durante los primeros días, algunos pocos pobladores accedieron a evacuar la zona con asistencia oficial o por medios particulares.

Sin embargo, la gran mayoría decidió permanecer en el Perilago para no abandonar sus granjas y animales. Además, se identificaron serias limitaciones para trasladar por vías navales a tal cantidad de habitantes, sus animales y sus bienes personales. Por lo tanto, estos esfuerzos por retomar la evacuación de las áreas afectadas viraron progresivamente a estrategias de control de daños y auxilio (**Figura A.3**). La asistencia social y rural se centró principalmente en: (1) el transporte y distribución de agua potable embotellada para el consumo humano y del ganado, debido a la interrupción de las fuentes habituales de vertiente, cubiertas completamente con ceniza volcánica; (2) el transporte y distribución de alimentos y suministros básicos para las personas y forraje para el ganado; (3) el transporte de personal médico y veterinario hacia el Perilago, para el chequeo del estado de salud de las personas y los animales; y (4) el traslado de las personas hacia centros urbanos, y de cabezas de ganado para su posterior venta (Anselmi et al. 2012; Outes et al. 2015; Salgado et al. 2022).

Estos operativos de asistencia comenzaron como esfuerzos aislados y desarticulados entre diversos organismos gubernamentales y no gubernamentales, el sector privado, y la ayuda de algunos particulares. Sin embargo, estas acciones pudieron ser cada vez más organizadas hasta plasmarse, casi un mes después del inicio de la erupción, en la constitución un Comité Local de Emergencia Rural (CLER) del Departamento Los Lagos, el 5 de agosto de 2011. Este comité estuvo integrado por representantes de diversas instituciones, que incluyeron el Instituto Nacional de



Figura A.3. Asistencia social y rural de los pobladores del Perilago del Nahuel Huapi. Fotos cortesía de Prefectura Naval Argentina.

Tecnología Agropecuaria (INTA), la Administración Parques Nacionales, el Parque Nacional Nahuel Huapi, la Municipalidad de Villa la Angostura, la Comuna de Villa Traful, las Asociaciones de Fomento Rural de El Rincón, Villa Traful, Cuyín Manzano y Villa La Angostura, la Biblioteca Popular Osvaldo Bayer y representantes de pobladores rurales del Perilago Nahuel Huapi, La Lipela, Pobladores Ruta 231, Ruta 40 y Ruta 231, entre otros (Anselmi et al. 2012). Desde este comité, se pudo coordinar la logística necesaria para continuar con la asistencia social y rural del Perilago del Nahuel Huapi y otras áreas afectadas (**sección A3.5**).

Desde este comité también se identificó la necesidad de abordar otras problemáticas a mediano y largo plazo, incluyendo atender a fragilidades estructurales y económicas preexistentes a la caída de ceniza volcánica en el Perilago. Para ello se tomó la iniciativa de incorporar un equipo técnico especializado al CLER, para llevar a cabo un diagnóstico de la situación de emergencia rural en el Departamento Los Lagos. Estos análisis posteriormente se plasmaron en el *Plan de emergencia para afrontar la crisis de la actividad rural tras la caída de cenizas de la erupción del volcán Puyehue (agosto 2011)* (Anselmi et al. 2012) entre otras producciones (p. ej., Valot & Spinelli 2012; Spinelli 2012).

Gran parte de la logística lacustre se llevó a cabo a bordo del ferry-barcaza *El Patagón*, el único buque de servicios de carga disponible en la región (**Tabla 1.1**). En un principio, este buque fue incorporado a la flota de una de las dos principales compañías de turismo lacustre que operan en los puertos del centro de Villa La Angostura, con el propósito de asistir con las navegaciones que se realizaban a la Isla Victoria (**Figura 1.13**). Aunque estos planes originales no llegaron a materializarse, El Patagón permaneció disponible en Villa La Angostura y volvió a desempeñar un papel vital durante la crisis geo-meteorológica que afectó a la ciudad durante el invierno de 2019 (**sección A5.2**).

En adición a El Patagón, también se implementaron numerosos guardacostas y otras embarcaciones menores y deportivas (**Tabla 1.1**) de Prefectura Naval Argentina y Parques Nacionales.

Nuevamente, primando la compulsión por atender a la emergencia, no hubo ningún tipo de sistema que permitiera registrar y cuantificar estos operativos de asistencia, como la cantidad de personas desplazadas, la relocalización y venta de animales, la cantidad de suministros transportados, etc. (Salgado et al. 2022). Además, la ausencia de registros censales precisos del ganado, debido al estilo informal de pastoreo abierto y extensivo dentro de los límites del Parque Nacional Nahuel Huapi, también dificultó la coordinación de la ayuda en zonas rurales.

A3.4. Varamiento en Puerto Blest

Debido a los inmensos volúmenes de ceniza volcánica que imposibilitaron la navegación del Lago Nahuel Huapi en la región de San Carlos de Bariloche, ocho trabajadores quedaron varados durante más de una semana en las instalaciones de Pto. Blest (**Tabla 1.2**).

Puerto Blest es un destino turístico de renombre mundial, situado en el extremo más occidental del Brazo Blest del Lago Nahuel Huapi, sobre la desembocadura del Río Frías (**Figura 1.13**). Y en la costa opuesta de la bahía se ubica también el Mlle. Cántaros (**Tabla 1.2**), un pequeño muelle de madera construido en 1958 exclusivamente para fines turísticos.

Este pintoresco puerto forma parte de un famoso circuito turístico que conecta la ciudad argentina de Bariloche (Pto. Pañuelo; **Tabla 1.1**) con la localidad trasandina de Puerto Varas, sobre el Lago Llanquihue. El recorrido combina tramos terrestres y lacustres, navegando los lagos Nahuel Huapi, Frías y Todos Los Santos, a bordo de tres buques de pasajeros, habitualmente los catamaranes *Gran Victoria*, *Victoria del Sur* y *Lagos Andinos*, respectivamente. El *Cruce Andino* (Turisur, S.R.L.) se realiza todos los días del año, atravesando el Paso Internacional Pérez Rosales (**Figura 1.13**) y requiriendo, como mínimo, un día completo para trasladarse de un país a otro. Particularmente, a Puerto Blest sólo puede accederse por medios navales, siendo el único lugar habitable en un radio de decenas de kilómetros.

En este sitio se ubica también el *Hotel Puerto Blest*, originalmente fundado en el año 1904 y sirviendo hasta el año 2009 como punto de escala para los pasajeros, cuando el tránsito lacustre comercial entre Argentina y Chile era mucho más intenso

La erupción del Cordón Caulle no produjo caídas piroclásticas en Pto. Blest, siendo que el sitio se ubica al oeste del área afectada por la caída de ceniza (**Figura 1.13**). Tampoco se registraron *pumice rafts* en las inmediaciones, puesto que no hay cuencas fluviales afectadas que drenen hacia bahía Blest los vientos predominantes del oeste arrastraron las inmensas masas de ceniza en flotación hacia la región sur y este del Lago Nahuel Huapi.

Sin embargo, la ceniza volcánica sí produjo una severa interrupción de la navegabilidad en los sitios portuarios que se ubican en los alrededores de Bariloche, puertos de partida y destino de todas las excursiones que llegan a este sitio, donde se registraron caídas de ceniza volcánica media a gruesa de hasta 50 mm de espesor (Villarosa & Outes 2013; Alloway et al. 2015; **Figura 1.13**).

La región sur sureste del Lago fue afectada también por inmensas masas de ceniza en flotación. Durante los primeros días de la erupción, las caídas primarias de ceniza formaron una delgada capa de material flotante que cubrió por algunos días la superficie del agua. Sin embargo, días subsiguientes, los vientos predominantes del noroeste arrastraron mayores volúmenes *pumice rafts*, compuestos por fragmentos pumíceos más gruesos. Debido a estas condiciones, Prefectura Naval Argentina de Bariloche impuso inmediatamente una restricción para la navegación en la región, la cual se extendería por un total de ocho días consecutivos.

Como consecuencia, los ocho trabajadores que se encontraban haciendo permanencia en Pto. Blest quedaron varados en las instalaciones del Hotel por los ocho días que duró la restricción, imposibilitados de retornar hacia la ciudad de Bariloche. Este grupo de personas estaba compuesto por tres trabajadores privados de la empresa concesionaria de Pto. Blest, un guardaparques y cuatro oficiales de Prefectura Naval Argentina. En simultáneo, otros cuatro agentes de la Gendarmería Nacional Argentina quedaron también varados en Pto. Frías, en el extremo sur del Lago Frías (**Figura 1.13**), también parte del recorrido de *El Cruce Andino*. Sin embargo, estos cuatro agentes pudieron evacuar inmediatamente hacia Chile, a través del Paso Internacional Pérez Rosales.

Una semana después, mejoradas mínimamente las condiciones para la navegación y restituidos los permisos para la circulación, el personal varado en Pto. Blest pudo ser evacuado hacia Puerto Pañuelo, y Bariloche, a bordo del *Catamarán Victoria del Lago* (un buque de pasajeros de primera; **Tabla 1**).

Es importante destacar que, al momento del día en que se iniciaron las caídas de ceniza volcánica en la región (pasadas las 19.00 hs UTC), los visitantes diurnos de Pto. Blest ya se encontraban de retorno en Bariloche, por lo que afortunadamente la interrupción de la navegabilidad no significó un mayor número de personas varadas. Tampoco hubo inconvenientes asociados al varamiento de personas pernoctando en el lugar, ya que en 2011 el Hotel de Pto. Blest no estaba habilitado para tales fines. Sin embargo, en el año 2015 el Hotel Pto. Blest se habilitó nuevamente para el pernocte de los pasajeros. Actualmente, el sitio puede albergar a un máximo de 650 personas durante el día más otras 50 personas durante la noche, lo que significa un número considerablemente mayor de personas que podrían necesitar de evacuación o asilo en caso de emergencias.

Por otro lado, también se registraron numerosos incidentes aislados a lo largo de toda la costa sureste del Lago Nahuel Huapi (Pto. Pañuelo, Club Náutico Bariloche, Pto. San Carlos, etc.; **Tabla 1.2**), asociados a encuentros de embarcaciones de distintos tipo, tamaño y gobierno con intensas caídas piroclásticas y la deriva de *pumice rafts*.

A3.5. Evacuaciones y auxilio en el Lago Traful

En los alrededores del Lago Traful (**Figura 1.13**), las caídas de hasta más de 50 mm de espesor de ceniza volcánica (Villarosa & Outes 2013; Alloway et al. 2015) también tomaron por desprevenido a muchas autoridades, gestores, respondientes y pobladores de la región, dando lugar a una cantidad de intentos de rescate y evacuación naval en sitios rurales, similar a lo descrito para el Perilago del Nahuel Huapi (**sección A3.3**).

En la costa sur del lago se asienta Villa Traful, una pequeña localidad con alrededor de tan solo 400 habitantes al 2010 (INDEC 2010). Villa Traful se ubica a 65 km del Cordón Caulle y puede ser accedida únicamente a través de la Ruta Provincial 65, un camino de ripio (al 2011) que une las Rutas Nacional 40 al oeste y Nacional 237 al este (**Figura 1.13**).

A lo largo de la costa norte de los lagos Traful y Pichi Traful existe una amplia zona rural, habitada por varias familias de pobladores del Parque Nacional Nahuel Huapi (PNNH 2018). Al igual que en el Perilago, el norte de Traful también se caracteriza por presentar un muy alto grado de aislamiento territorial. Esta región remota es prácticamente inaccesible a través de vías terrestres, exceptuando por dos sendas que conectan a las poblaciones de los extremos oriental y occidental del lago con las Rutas Provincial 65 y Nacional 40, respectivamente (**Figura 1.13**). Estos caminos demoran en recorrerse unas 8 horas a caballo, aproximadamente. Los pobladores dependen entonces del transporte lacustre para movilizarse hacia Villa Traful u otras rutas de acceso vehicular. Para esto, las embarcaciones disponibles son limitadas y corresponden a lanchas de autoridades lacustres locales (Parques Nacionales, Seccional Villa Traful) o embarcaciones particulares muy precarias que incluyen algunos pequeños botes de madera impulsados a remo. La principal actividad económica en esta región rural se basaba en la actividad ganadera extensiva. Y el abastecimiento de agua para consumo consistía primordialmente en sistemas con tomas superficiales de arroyos y vertientes (PNNH 2018). Para el año 2011, ninguna de las familias del norte del Lago Traful contaba con sistemas de suministro eléctrico, ni recursos de telecomunicaciones.

Justamente, todas estas condiciones de aislamiento y vulnerabilidad de los servicios de infraestructura crítica, apreciados como inadecuados e insuficientes para la toma de refugio *in-situ* por parte de las autoridades locales, fueron las principales causas que animaron dos intentos de rescate naval de los pobladores del norte de Traful, independientes entre sí, pero igualmente infructuosos.

A3.5.1. Intento de rescate de pobladores del Pichi Traful

Cuatro días después de iniciada la erupción, las autoridades de Parques Nacionales integradas al COE de Villa La Angostura resolvieron iniciar un primer intento de rescate de las dos poblaciones rurales que habitan la costa norte del Pichi Traful. Esto estuvo motivado principalmente

por la incomunicación y falta de conocimiento sobre el estado de las familias afectadas por la intensa caída piroclástica.

Para esto, se remolcó un bote tipo RIB (**Tabla 1.1**) desde la seccional de Parques Nacionales en el Lago Espejo a través de la Ruta Nacional 40 hasta el camping del Pichi Traful, ubicado en el extremo noroeste del lago (**Figura 1.13**). Desde allí, una tripulación compuesta por tres oficiales, dos guardaparques y un agente de la policía, iniciaron la navegación hasta alcanzar a los pobladores, con el primer objetivo de acercar suministros de emergencia (alimentos y agua embotellada) e iniciar la inmediata evacuación del área. Sin embargo, finalmente, los pobladores se rehusaron a abandonar sus familias, granjas y animales, decidiendo permanecer refugiados *in-situ*.

Este operativo se realizó con grandes dificultades para navegar, debido a la intensa e incesante caída de ceniza volcánica sobre el lago y la acumulación de pómez en flotación sobre la superficie del agua. Afortunadamente, la reducida visibilidad en el aire y el agua fue suficiente para permitir la orientación de los brigadistas durante toda la navegación, sin reportarse tampoco fallos en los dispositivos de navegación y posicionamiento (**sección 3.2.5**). No obstante, a lo largo de todo el operativo, ocurrieron numerosísimos fallos intermitentes en el motor marítimo, debido a la obturación de los circuitos de refrigeración del fueraborda (**sección 3.2.6**), lo que significaba la necesidad de detener la embarcación para desarmar y despejar de fragmentos pumíceos el circuito de *agua de mar*, exponiendo a los tripulantes a situaciones de riesgo de deriva.

El remolque vial de la embarcación, desde la seccional de Parques Nacionales en el Lago Espejo hasta el camping del Pichi Traful también se vio fuertemente obstaculizado por la caída e inmediata removilización eólica de la ceniza volcánica, asociadas a la caída de árboles sobre la ruta, el sepultamiento de las marcaciones, pérdidas de fricción, baja visibilidad atmosférica, etc.

A3.5.2. Intento de rescate de pobladores desde Villa Traful

Por otro lado, casi diez días después de iniciada la erupción del Cordón Caulle, los miembros de la *Sala de Situación*, un comité de emergencia local organizado en Villa Traful, iniciaron también un intento infructuoso de rescate de los pobladores del norte del Lago Traful.

Las caídas de ~50 mm de ceniza media a fina en los alrededores de Villa Traful (Villarosa & Outes 2013; Alloway et al. 2015) generaron interrupciones de los suministros de energía eléctrica y agua potable durante las dos primeras semanas de la erupción. También se un corte total en el acceso vial a la localidad, en la Ruta Provincial 65, debido a las pésimas condiciones para el manejo, la caída de árboles sobre la ruta y la ocurrencia de lahares (Villarosa & Outes 2013; Wilson et al. 2013; Alloway et al. 2015; Elissondo et al. 2015). Debido a esta situación de aislamiento, los operativos de respuesta en Villa Traful debieron ser coordinados desde la Sala de Situación, una asamblea que se asentó en el Destacamento Policial de Villa Traful, y que permaneció operativa desde el 5 de junio y por alrededor de dos meses.

Al restituirse la conectividad vial entre Villa Traful y Villa La Angostura, el centro urbano más próximo, ubicado a unos 60 km de distancia, se inició otro intento de rescate de los pobladores rurales que habitan la costa norte del Lago Traful. En este caso, el operativo se inició con la

colaboración de oficiales de Prefectura Naval Argentina y Protección Civil de Villa La Angostura, cuando arribaron a Villa Traful casi diez días después de iniciada la erupción. Este intento de rescate estuvo motivado por la conocida situación de aislamiento, incomunicación y vulnerabilidad de los servicios de infraestructura crítica de los pobladores rurales.

El operativo se realizó a bordo de otro bote tipo RIB (**Tabla 1.1**) de la Administración de Parques Nacionales, usualmente operativo en Pto. Traful (**Tabla 1.2**), con la intención de corroborar el estado de seguridad de los pobladores, transportar suministros de emergencia como alimentos y agua embotellada, y evacuarlos hacia Villa Traful. Al llegar al sitio se pudo verificar que, a pesar de contar con embarcaciones propias y funcionales, ninguno de pobladores había abandonado el área. Al igual que los pobladores del Pichi Traful, estas familias también rechazaron la recomendación de evacuar el área, decidiendo permanecer refugiados en el lugar.

Si bien este operativo se realizó una vez mejoradas mínimamente las condiciones para la navegación en el lago, nuevamente ocurrieron reiterados fallos intermitentes en el sistema de propulsión del RIB, debido a la obturación de los circuitos de refrigeración del fueraborda (**sección 3.2.6**). Esto significó la necesidad de detener la navegación en numerosas oportunidades y de desarmar y despejar de fragmentos pumíceos el circuito de *agua de mar*.

A3.5.3. Situación post evento

Luego de estos intentos infructuosos de evacuación, se continuaron realizando con algunos esfuerzos por movilizar suministros, personas y ganado de los alrededores del lago. Pero debido a la condición de aislamiento por medios viales, muchos de estos operativos de asistencia se vieron demorados.

A diferencia de otras regiones rurales del Parque Nacional Nahuel Huapi, las estrategias de respuesta a la crisis rural en Traful incluyeron la venta inmediata del ganado, antes de que este degradase su calidad y cayeran los precios, mitigando así parte de los efectos negativos de la caída de ceniza volcánica. Todos estos esfuerzos estuvieron centrados tanto en la Sala de Situación de Villa Traful y el Comité Local de Emergencia Rural (CLER) del Departamento Los Lagos (**sección A3.3.2**).

En contraste a lo descripto para el *Perilago* del Nahuel Huapi (**sección A3.3**), prácticamente no se introdujeron cambios o adaptaciones relevantes en las actividades económicas del norte del Lago Traful o Pichi Traful, luego de la crisis asociada a la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012. Tampoco se observaron modificaciones en los diseños de los sistemas de toma de agua potable, ni para el suministro de energía eléctrica o las comunicaciones, aspectos críticos que justamente determinaron la decisión de iniciar ambos operativos de rescate (**sección A3.5.1**; **sección A3.5.2**). Y la incorporaron de nuevas embarcaciones, oficiales o particulares, se realizaron por motivos ajenos a la situación de emergencia experimentada.

En ninguno de estos casos hubo registro escrito alguno que diera cuenta de los intentos de rescate de pobladores del norte del Lago Traful o Pichi Traful, ni de las personas, animales o suministros movilizados (Salgado et al. 2022).

A3.6. Auxilio en los alrededores de los Lagos Lácar & Nonthué

Tanto la erupción del Cordón Caulle en 2011-2012 como la subsiguiente erupción del Calbuco de 2015 provocaron una prolongada interrupción del tráfico vial y naval en los alrededores de los Lagos Lácar y Nonthué (**Figura 1.14**).

Ambos eventos causaron serios problemas de accesibilidad en la región, lo que llevó a la implementación de numerosas operaciones de respuesta naval por parte de las autoridades locales. Estos operativos se describen en la sección siguiente (**sección A4.1**).

A4. LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN CALBUCO DE 2015

A4.1. Auxilio en los alrededores de los Lagos Lácar & Nonthué

Los Lagos Lácar y Nonthué son dos lagos de origen glaciario que se localizan en el departamento Lácar de la Provincia del Neuquén, dentro del Parque Nacional Lanín y próximo al límite internacional con Chile (**Figura 1.14**). En su extremo más oriental, se asienta la localidad costera de San Martín de los Andes, a la que puede accederse a través de la famosa *Ruta de los Siete Lagos* (un tramo turístico y pavimentado de la Ruta Nacional 40 que conecta con Villa La Angostura) y la Ruta Provincial 48 (un camino de ripio que bordea el margen norte de los lagos hasta el Paso Internacional Hua-Hum).



Figura A.4. Caída y resuspensión eólica de ceniza volcánica fina sobre los accesos viales de San Martín de los Andes, durante la erupción del volcán Calbuco de 2015.

Desde la localidad, una única empresa turística mantiene la concesión del transporte comercial de pasajeros, a bordo de tres grandes buques de pasajeros de primera (**Tabla 1.1**). Estos servicios incluyen la conexión diaria entre el Pto. Lácar o Pto. San Martín de Los Andes (**Tabla 1.2**) y los parajes Quila Quina (Pto. Don Bruno; **Tabla 1.2**) y Hua-Hum (Pto. Hua-Hum; **Tabla 1.2**).

La amplia mayoría de los pobladores de estos y otros parajes cercanos dependen de los servicios diarios que ofrece esta empresa turística, para trasladarse desde y hacia San Martín de los Andes, el único centro urbano de la zona. Esto es debido a que las rutas de acceso vial son muy limitadas y bastante accidentadas. Incluso, algunos sitios en los alrededores del lago pueden ser accedidos únicamente por vías navales (**Figura 1.14**).

Esta región fue afectada, respectivamente, por entre 2 mm y 4 mm de ceniza riolítica fina (**Figura 1.13**), y por entre 7 mm y 12 mm de ceniza dacítica-andesítica fina (**Figura 1.14**), a causa de

las erupciones de los volcanes Cordón Caulle y Calbuco. En ambos casos, los accesos viales en la zona se vieron interrumpidos por la continua persistencia de la ceniza volcánica en los caminos, debido a la persistente emisión piroclástica, para el caso de la erupción de 2011-2012, y a los repetitivos eventos de resuspensión eólica de las fracciones más finas, para el caso de la erupción de 2015 (**Figura A.4**).

La primera caída de ceniza volcánica en San Martín de Los Andes se registró la mañana del 6 de junio de 2011, dos días después del inicio de la erupción del Cordón Caulle, debido a un cambio abrupto en el patrón de dispersión de la pluma eruptiva primero hacia el nor-noreste y luego hacia el sureste. En este caso, las autoridades locales restringieron la conducción vehicular en la zona, incluso para ambulancias y vehículos sanitarios, debido al potencial peligro para la salud y a las pésimas condiciones para el manejo, asociadas a una fuerte disminución de la visibilidad, el sepultamiento de marcas y señalizaciones y la formación de superficies resbalosas sobre la ruta.

Ahora bien, en simultáneo, las autoridades de Prefectura Naval Argentina en San Martín de los Andes ya habían sido advertidas por parte de colegas de Villa La Angostura respecto a los posibles efectos de la ceniza volcánica sobre las embarcaciones (**sección A3.3.1**). Por ello, se decidió también inhibir inmediatamente todo tipo de navegación en los Lagos Lácar y Nonthué.

De esta forma, todos los accesos en los alrededores quedaron completamente interrumpidos, tanto por vías lacustres como terrestres.

Debido a esta condición de aislamiento, las autoridades lacustres en la región decidieron preservar la operatividad de una única embarcación oficial (un guardacostas tipo RIB; **Tabla 1.1**) de entre las cuatro embarcaciones oficiales disponibles, para poder asistir a los pobladores de los alrededores de los lagos, varados por esta interrupción de las accesibilidades. Esta embarcación se destinó especialmente para movilizar evacuados, personal médico y suministros básicos y de emergencia entre los distintos parajes aislados y San Martín de Los Andes. Estas acciones se centraron primordialmente en los parajes Quilahuentos, Quila-Quina y la Seccional del Parque Nacional Lanín en Hua-Hum (**Figura 1.14**). La asistencia lacustre se extendió por algunos meses, debido a la persistencia de la caída primaria y la constante resuspensión eólica de la ceniza volcánica, sin registrarse afortunadamente ningún tipo de incidente asociado al impacto de la ceniza sobre esta única embarcación operativa. En simultáneo, en Pto. San Martín y sus alrededores, muchas de las embarcaciones oficiales y particulares terminaron siendo, de manera preventiva, retiradas a seco y puestas a reparo.

Muchas de las lecciones aprendidas durante este evento pudieron ser puestas en práctica durante la erupción del volcán Calbuco de 2015 (**Figura A.5**). Sin embargo, en este caso, la caída discreta de ceniza volcánica causó una interrupción en el transporte naval de pasajeros de tan solo dos días. Esto estuvo determinado por el tiempo que se demoró la limpieza y despeje de ceniza acumulada sobre las embarcaciones y el puerto de San Martín.

Si bien los eventos de resuspensión eólica causaron serios impactos en muchos de los servicios de infraestructura crítica de San Martín de Los Andes y sus alrededores, estos no afectaron

la navegación del lago, con la que se solventaron muchas de las problemáticas asociadas a la interrupción de la accesibilidad terrestre. Las autoridades locales y los operarios en Pto. San Martín señalan que la ubicación de Pto. San Martín a sotavento del Lago Lácar (**Figura 1.13; Figura 1.14**) salvaguardó al puerto y las embarcaciones de los efectos adversos de la removilización eólica de ceniza volcánica. Por ello, las navegaciones comerciales y el transporte de pasajeros pudieron ser retomados de forma casi inmediata.



Figura A.5. Caída de ceniza volcánica fina en Pto. San Martín, durante la erupción del volcán Calbuco de 2015.

Durante estos dos días, las autoridades lacustres realizaron intensas salidas de relevamiento del estado de seguridad en muchos de los parajes afectados. Algunas de estas salidas de reconocimiento y transporte de personas, suministros y respondientes a bordo de embarcaciones oficiales se repitieron ocasionalmente durante las semanas subsiguientes a la erupción del Calbuco de 2015.

Nuevamente, y para ambos casos, no existió ningún sistema de registro oficial escrito que detallara y cuantificara las acciones de respuesta realizadas por las autoridades locales. Tanto los agentes vinculados al manejo de la emergencia en San Martín de Los Andes, así como varios de los agentes del sector turístico privado remarcaron que ambos eventos ocurrieron particularmente durante la temporada turística baja para el sector lacustre, considerando que posiblemente los cursos de acción de respuesta a la emergencia hubieran sido potencial y significativamente mayores en caso de ocurrir durante la temporada estival.

A4.2. Riesgo de aislamiento en el Lago Huechulafquen & Epulafquen

La erupción del volcán Calbuco de 2015 no motivó ningún tipo de operativo de respuesta naval en la región de los Lagos Huechulafquen y Epulafquen. Sin embargo, el relevamiento de impactos de ceniza volcánica en la región (**sección 3**) permitió entrever escenarios de riesgo de aislamiento territorial para Pto. Canoa (**Tabla 1.2**) y las numerosas poblaciones rurales que se asientan sobre las costas de los lagos.

Los Lagos Huechulafquen y Epulafquen, junto al Lago Paimún, forman parte de un mismo sistema lacustre de origen glaciario, el más extenso del Parque Nacional Lanín, en el Departamento de Huiliches, Provincia del Neuquén (**Figura 1.14**). Sobre estos lagos de ubicación remota no se asienta ningún tipo de centro urbano, siendo la ciudad de Junín de Los Andes la localidad más cercana.

En la costa norte del Lago Huechulafquen se encuentra Pto. Canoa (**Tabla 1.2**), un reconocido destino de interés turístico que sirve como asiento para recorridos recreativos en redondo hacia Pto. Encuentro (**Tabla 1.2**). A Pto. Canoa puede accederse únicamente a través de la Ruta Provincial 61, un extenso camino de ripio que conecta con Junín de Los Andes hacia el este. Hacia al oeste, la ruta concluye en una amplia zona de acampes y alojamientos turísticos, sobre la costa norte del Lago Paimún (**Figura 1.14**). Además de estos destinos turísticos, existen numerosas poblaciones rurales que habitan los alrededores de estos lagos, muchas de ellas, inaccesibles por medios viales.

Durante la erupción del volcán Calbuco de 2015, Pto. Canoa fue afectado por ~3 mm de ceniza dacítica fina. Pero la cantidad de ceniza caída sobre la Ruta Provincial 61 se incrementó considerablemente hacia el este, superando los 15 mm de espesor de caída (**Figura 1.14**). Esto imposibilitó el acceso vehicular a Pto. Canoa por un total de 20 días consecutivos, demorando la posibilidad de realizar tareas de despeje de ceniza y mantenimiento sobre el puerto y las embarcaciones que allí operan.

De todos modos, este evento particular de caída piroclástica no condujo a la necesidad de iniciar ningún tipo de operativo significativo de respuesta naval en la región.

Por otro lado, es importante considerar que los Lagos Huechulafquen y Epulafquen se encuentran ubicados inmediatamente al sur del estratovolcán activo Lanín (39.7° S - 71.5° O; **Figura 1.14**) en el límite internacional entre Argentina y Chile. Esto significa que Pto. Canoa, su único acceso vial, y los pequeños asentamientos costeros sobre los lagos se hallan particularmente expuestos a una variedad de peligros de origen volcánico. La afección directa o indirecta de estos sitios podría entonces significar la necesidad de responder a futuras situaciones de emergencia por medios navales, agravada en el caso de ocurrir en temporadas de mayor influjo turístico de visitantes.

A5. LA CRISIS GEO-METEOROLÓGICA DEL INVIERNO DE 2019 EN VILLA LA ANGOSTURA

Durante el invierno de 2019, una intensa tormenta de nieve y un formidable volcamiento de rocas sobre la Ruta Nacional 40 interrumpieron en simultáneo los únicos dos accesos terrestres a la localidad andina de Villa La Angostura por todo un mes, recluyendo a turistas y residentes en una ciudad azotada por la mayor tormenta registrada desde 1994 (AIC 2021).

Durante la noche del 20 de julio de 2019 inició una nevada la zona norte del Parque Nacional Nahuel Huapi que terminaría significando la mayor tormenta y caída de nieve registradas en los últimos 25 años. La tormenta acumuló espesores de nieve que superaron los 120 cm (AIC 2021) sobre la famosa *Ruta de los Siete Lagos*, un reconocido tramo turístico pavimentado de la Ruta Nacional 40 que conecta a la localidad de Villa La Angostura hacia el norte con San Martín de Los Andes (**Figura 1.14**). La tormenta estuvo acompañada por inmensas caídas de árboles tanto sobre la ruta como en la ciudad, y estuvo seguida por fuertes precipitaciones que terminaron por cubrir a

los caminos con nieve, hielo e inmensas cantidades de lodo, detritos y restos de vegetación (AIC 2021).

Las caídas de árboles en toda la región provocaron una interrupción del suministro eléctrico en la ciudad que se extendió por un total de 16 días consecutivos. Esto generó en la ciudad un aumento significativo en la necesidad de abastecimiento con combustibles para los generadores eléctricos que sustentan algunos servicios de infraestructura críticos, como la toma y suministro de agua potable (Wilson et al. 2013). Así, durante uno de los breves y escasos momentos en los que pudo habilitarse de forma parcial la circulación sobre la *Ruta de los Siete Lagos*, ocurrió un grave accidente vial que involucró a uno de los camiones cisterna que ingresaba a Villa La Angostura para el abastecimiento de combustibles. Esto causó no sólo la obstrucción de la carretera, sino que también un extenso derrame de combustible y el inicio de un perdurable y severo incendio forestal que afectó las inmediaciones de la ruta (Municipalidad VLA 2019a). Este siniestro se produjo el día 26 de julio por la tarde, a la altura del 2.161 km, en las cercanías del Lago Escondido (Municipalidad VLA 2019b) y significó la necesidad de realizar un total de 8 traslados aéreos durante los dos días siguientes al accidente (Municipalidad VLA 2019a). Como consecuencia de todo ello, la única conexión vial de Villa La Angostura hacia el norte permaneció interrumpida de manera intermitente durante varias semanas.

En la ciudad, muchos barrios experimentaron también prolongados cortes en el suministro de agua potable domiciliaria debido a su dependencia del suministro de energía eléctrica, una característica de vulnerabilidad de los servicios de infraestructura crítica de la localidad identificados luego de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 (Wilson et al. 2013). La caída de árboles en las inmediaciones causó también una interrupción de las telecomunicaciones y daños severos sobre algunos vehículos y edificaciones. También se registraron numerosos focos de incendios urbanos que resultaron en la destrucción completa de algunas viviendas residenciales en Villa La Angostura.

De manera simultánea, y por motivos completamente ajenos a la tormenta de nieve, también se registró en la localidad una inusitada disminución en el abastecimiento de gas natural. Este faltante estuvo asociado a un incidente ocurrido casi una semana después de iniciada la tormenta de nieve, cerca de la localidad de Plaza Huincul (en el Departamento de Confluencia, Provincia del Neuquén), donde los trabajos de una máquina vial retroexcavadora causaron accidentalmente la rotura del gasoducto cordillerano que abastece a muchas localidades patagónicas. El faltante se registró entonces desde la localidad de Junín de Los Andes (Provincia del Neuquén) hasta Esquel (Provincia de Chubut) e incluyó a las localidades vecinas de Villa La Angostura, San Martín de Los Andes y San Carlos de Bariloche (TSG 2019).

En Villa La Angostura la emergencia climática estuvo gestionada por un Comité de Operaciones de Emergencia local que, casualmente, se encontraba ya operativo manejando la contención de un período de afluencia del Síndrome Pulmonar por Hantavirus (Municipalidad VLA 2019c).

Tan solo dos días después de iniciada la tormenta de nieve que afectó la conectividad norte de la ciudad ocurrió un rápido e inmenso volcamiento de rocas (Hungre et al. 2014), directamente

sobre la Ruta Nacional 40 a la altura del kilómetro 2094, próximo a Pto. Huemul (**Figura 1.13**). El impresionante muro de roca desprendido de 40 m de altura y un volumen estimado de 1.000 m³ (Geol. Aceituno, Vialidad Nacional, *com. pers.*) fue captado en videos e imágenes, sepultando un tramo de la ruta que une Villa La Angostura con San Carlos de Bariloche. Esto significó la completa interrupción del tráfico de este importante acceso arterial por un total de 29 días consecutivos.

Las obras de remediación se vieron obstaculizadas por las adversas condiciones climáticas y la necesidad de encontrar métodos adecuados tanto para la remoción del material caído como para el acondicionamiento del frente rocoso, ya que el principal conducto de gas que abastece a la ciudad corre en paralelo a este tramo de ruta, a tan solo 50 cm de profundidad de la superficie (Geol. Aceituno, Vialidad Nacional, *com. pers.*). Así, las obras de estabilización de la pendiente debieron retardarse hasta septiembre de 2019, causando nuevos y ocasionales cortes de tránsito y un faltante de suministro de gas en la ciudad. Todos estos trabajos estuvieron supervisados y ejecutados principalmente por Vialidad Nacional Argentina y la empresa COARCO S.A.

La tormenta de nieve y volcamiento de rocas sobre la Ruta Nacional 40 bloquearon por completo las dos únicas vías de acceso vial a Villa La Angostura, aislando la ciudad por casi un mes entero.

Durante las primeras semanas de la emergencia debieron habilitarse dos centros de evacuación en Villa La Angostura, con el fin de alojar y refugiar a los transientes varados y a los residentes cuyas residencias se vieron afectadas por la tormenta. Durante este tiempo, muchos de los pobladores rurales del Perilago del Nahuel Huapi (**sección A3.3**) requirieron también de auxilio y asistencia por medio de un helicóptero y vuelos sanitarios. Las autoridades locales emitieron una alerta municipal para la emergencia social, económica y ambiental el 24 de julio (Municipalidad VLA 2019d), la cual debió ser prolongada por un total de dos meses consecutivos (Municipalidad de VLA 2019e).

A5.1. Evacuación nocturna de visitantes diurnos

El martes 23 de julio, la misma noche en que el volcamiento de rocas sobre la Ruta Nacional 40 terminó de bloquear todos los accesos terrestres de Villa La Angostura, se llevó a cabo un operativo nocturno de evacuación naval para trasladar a personas varadas hacia la ciudad de San Carlos de Bariloche.

Debido a la completa interrupción vial miles de visitantes diurnos que recorrían los alrededores de Villa La Angostura y San Martín de los Andes quedaron varados en la localidad andina, sin posibilidad de evacuar por ningún medio terrestre. A causa de esto, numerosas autoridades de Bariloche y Villa La Angostura emprendieron la coordinación de un operativo lacustre que permitiera evacuar a estas personas hacia Bariloche. Esto incluyó a la Secretaría de Seguridad de San Carlos de Bariloche, el Ministerio de Turismo y la AVVITUA (una agrupación de agencias de turismo de Bariloche), en asociación con la Municipalidad de Villa La Angostura y con la asistencia de Protección Civil, Bomberos Voluntarios, Prefectura Naval Argentina, la Administración

de Parques Nacionales, la Agencia de Seguridad Vial, el Ejército Argentino y la Policía de Neuquén, entre otros.

El motivo principal para decidir ejecutar este operativo extraordinario fue la situación de emergencia general en la que se encontraba Villa La Angostura, debido a la grave interrupción de los servicios de infraestructura crítica y la imposibilidad de refugiar tal número de personas en una localidad ya abarrotada, en plena temporada turística invernal. Hacia la primera noche del aislamiento, los dos centros de evacuación habilitados ya se encontraban completamente ocupados.

Esa misma tarde, tres grandes embarcaciones turísticas de Bariloche, que operan regularmente desde Pto. Pañuelo (**Tabla 1.2**), regresaron rápidamente de sus excursiones habituales para iniciar la navegación de rescate hacia Villa La Angostura. Las embarcaciones involucradas fueron los buques de pasajeros de primera (**Tabla 1.1**) *Modesta Victoria*, el *Catamarán Gran Victoria* y el *Catamarán Cau-Cau*, los cuales son actualmente gestionados por dos grandes empresas de turismo lacustre de Bariloche.

Esta travesía nocturna y excepcional requirió de la escolta de numerosas embarcaciones pequeñas (guardacostas; **Tabla 1.1**) de Prefectura Naval Argentina de Bariloche. La autoridad lacustre colaboró proporcionando orientación y alumbramiento para las embarcaciones mayores. Esto fue especialmente porque las aguas abiertas del Lago Nahuel Huapi carecen de balizamiento, ya que, por cuestiones de conservación, la navegación nocturna del lago está estrictamente restringida.

Las embarcaciones pudieron arribar al Pto. Modesta Victoria (**Tabla 1.2**), en la *Bahía Mansa* de Villa La Angostura (**Figura 1.13**), cerca de las 21.30 hs y el proceso de embarque de evacuados no comenzó hasta pasadas las 22.00 hs. El operativo de embarque debió completarse en medio de condiciones meteorológicas muy desfavorables y a oscuras, debido a la interrupción del servicio de infraestructura crítica que afectaba la localidad. Nuevamente, Prefectura Naval debió asistir con la iluminación con linternas, para posibilitar el embarque de los pasajeros y las maniobras de los buques en la bahía portuaria.

Los guías turísticos locales colaboraron en los procesos de embarque, traslado y desembarque del abultado grupo de evacuados, compuesto en su mayoría por visitantes transientes (**sección 2.4.4**).

Finalmente, el desembarco en Pto Pañuelo de los aproximadamente 800 evacuados concluyó pasada la 1.30 hs de la madrugada del 24 de julio.

A5.2. Movilización de transientes y residentes varados (en catamaranes)

Durante el transcurso del siguiente mes, y a causa de la persistencia de las condiciones de aislamiento vial, se debió llevar a cabo una evacuación regular de las numerosas personas varadas en Villa La Angostura, a bordo de los dos catamaranes turísticos que operan habitualmente en la ciudad.

Inmediatamente después del exitoso rescate nocturno de turistas (**sección A5.1**) se hizo evidente la necesidad de continuar evacuando a visitantes y residentes de Villa La Angostura, varados en una localidad severamente afectada por la tormenta de nieve.

En respuesta a esta situación, las dos principales empresas de turismo lacustre que operan en la ciudad emprendieron la coordinación de un periódico operativo de retirada de personas a bordo de los dos únicos buques de pasajeros de primera disponibles (**Tabla 1.1**), los catamaranes *Patagonia Argentina* y *Futaleufú*. Estos traslados comenzaron el 26 de julio, tres días después del volcamiento de rocas y la evacuación nocturna de turistas varados (**sección A5.1**), y extendería por casi todo un mes, hasta completada la restauración de las accesibilidades viales de Villa La Angostura, el 20 de agosto del mismo año.

Durante los primeros días del operativo, entre el 26 y el 30 de julio, las empresas posibilitaron la evacuación de las personas varadas desde los dos principales puertos de la ciudad hacia Pto. Pañuelo, en Bariloche (**Figura 1.13; Tabla 1.2**), atravesando el Lago Nahuel Huapi en un único respectivo traslado diario.

No obstante, muy pronto se hizo evidente que esta ruta naval presentaba numerosos inconvenientes, ya que resultaba ser extremadamente costosa, lenta (implicando tramos de más de dos horas de navegación) y subordinada a las condiciones meteorológicas adversas que pudieran demorar, dificultar o incluso imposibilitar el cruce del lago.

Frente al pronóstico desfavorable para la navegación de los días venideros, las empresas debieron modificar la ruta de evacuación original. A partir del 31 de julio, tras completar 5 días de evacuación hacia Pto. Pañuelo, se estableció un nuevo punto de destino en Puerto Huemul (**Figura 1.13**). Este sitio se encuentra ubicado en la costa norte del Brazo Huemul del Nahuel Huapi, dentro de una bahía natural a más de 20 km de Villa La Angostura e inmediatamente después del sitio afectado por el volcamiento de rocas (**sección A5**).

Dado que en Puerto Huemul no existe ningún tipo de infraestructura portuaria que sirva a grandes embarcaciones, una de las compañías de turismo involucradas dispuso del uso del ferry-barcaza El Patagón, el único buque de servicios (**Tabla 1.1**) disponible en la región (**sección A3.3.2**). El Patagón se atracó en la costa de Puerto Huemul para que sirviera a modo de muelle flotante y permitiera el desembarco de los pasajeros en este nuevo punto de destino (**Figura 2.3; Figura 2.7; Figura A.6**).

Esta nueva ruta naval permitió acortar considerablemente los tiempos y costos de evacuación, y lograr la independencia de las condiciones climáticas adversas, lo que posibilitó un aumento de la frecuencia de los traslados de uno a dos viajes diarios por embarcación.

A partir de este sitio, la evacuación se completaba por vías terrestres hacia la ciudad o aeropuerto de Bariloche. Sin embargo, a la altura de Puerto Huemul, la Ruta Nacional 40 se distancia por más de un kilómetro de la costa del lago, con lo que esta nueva ruta de evacuación implicaba una caminata cuesta arriba sobre nieve o barro y en condiciones meteorológicas sumamente adversas. Entonces, una semana después del cambio de ruta de evacuación, las autoridades iniciaron las obras necesarias para permitir la circulación de vehículos entre Puerto Huemul y la ruta, facilitando significativamente el proceso de evacuación (**Figura 2.3**). Todos estos operativos se realizaron con el personal regular de las empresas, más un agente adicional que coordinara los transportes terrestres. Los procesos de embarque y desembarque de los evacuados también estuvieron asistidos por autoridades lacustres locales.



Figura A.6. Embarque de residentes y turistas al *Catamarán Patagonia Argentina*, con apoyo del ferry barcaza *El Patagón* en Puerto Huemul, semanas después de la tormenta de nieve y volcamiento de rocas que aislaron por medios terrestres a la localidad de Villa La Angostura.

Las empresas estimaron que, durante los 26 días de operativo, los catamaranes transportaron alrededor de 6.300 y 6.500 personas respectivamente, primero hacia Bariloche (durante la primera semana) y luego hacia Puerto Huemul (durante las siguientes tres semanas), un total de ~12.800 personas.

A5.3. Movilización de transientes y residentes varados (en *transportes diferenciales*)

En simultáneo a la movilización de personas varadas a bordo de los catamaranes (**sección A5.2**), otras embarcaciones particulares se acoplaron también a los esfuerzos de evacuación regular hacia Bariloche y Puerto Huemul.

Debido a la completa interrupción de la actividad náutica recreativa, algunos proveedores de turismo lacustre de la localidad también dispusieron de sus buques de pasajeros de segunda y otras embarcaciones menores y deportivas (**Tabla 1.1**) para la evacuación de transientes y residentes, inicialmente, hacia Pto. Pañuelo (**Figura 1.13**). Estos traslados privados comenzaron el 24 de julio de 2019, un día después de ocurrido el volcamiento de rocas sobre la Ruta Nacional 40 y fueron concretados principalmente por cuatro grandes proveedores *diferenciales* de Villa La Angostura. Estas primeras embarcaciones contaban con la capacidad suficiente como para

transportar hasta Pto. Pañuelo un promedio de 10 personas por viaje y por embarcación, lo cual se realizó por poco más de una semana.

Sin embargo, y al igual que como sucedió posteriormente con los catamaranes (**sección A5.2**), pronto se hizo evidente que esta ruta naval resultaba ser extremadamente lenta, costosa y muy dependiente de las condiciones meteorológicas. Por estas razones, la mayor parte de los transportistas abandonó este cometido al iniciarse el servicio regular de los catamaranes tres días después (**sección A5.2**), el cual resultaba ser una alternativa mucho más eficiente, económica y segura. Los transportistas restantes optaron por acoplarse a la nueva ruta de evacuación que habían establecido en Puerto Huemul los dos grandes catamaranes (**sección A5.2**), un emprendimiento al que también se incorporaron muchos nuevos proveedores particulares. Todos estos transportes diferenciales operaron de manera diaria, con la máxima capacidad de pasajeros permanentemente completa, hasta el momento en que se restauró la conectividad terrestre en Villa La Angostura el siguiente 20 de agosto de 2019.

La agrupación de transportistas consultados estimó que se completó la evacuación de unas ~1.200 personas hacia Bariloche, durante los primeros ocho días de aislamiento; y otras ~2.400 personas hacia Puerto Huemul, durante las siguientes tres semanas.

A5.4. Continuación del transporte

Una vez superada la situación de emergencia, pero sin haberse restaurado aún la conectividad terrestre en Villa La Angostura, los mismos recursos navales que inicialmente permitieron la evacuación de las personas varadas, se convirtieron también en las únicas vías de entrada y salida de visitantes y residentes de la localidad.

Particularmente, muchas de las consecuencias que tuvo la tormenta de nieve en Villa La Angostura, como la disrupción de los servicios de infraestructura crítica y la afección de numerosas facilidades críticas, pudieron ser remediadas mucho antes de restablecerse la conectividad terrestre a la ciudad. Esto se debió principalmente a las dificultades que surgieron para reacondicionar la transitabilidad en los dos tramos de ruta afectados por la tormenta de nieve (la *Ruta de los Siete Lagos*) y el volcamiento de rocas (la Ruta Nacional 40). A partir de esto, la municipalidad de Villa La Angostura inició una fuerte campaña para reactivar la actividad económica en la ciudad. Así, las mismas vías navales que se utilizaban para evacuar a las personas de la ciudad durante la situación de emergencia, comenzaron a ser promovidas como una atracción turística, una vía alternativa de ingreso de visitantes a la ciudad. Incluso, esta forma de traslado se transformó en la única posibilidad de transporte de los residentes de la ciudad que trabajaban fuera de Villa La Angostura, y viceversa.

En la ciudad de Bariloche, dada la persistencia de la interrupción de los accesos viales, también comenzaron a ofrecerse traslados extraordinarios entre Pto. Pañuelo y Villa La Angostura a bordo de grandes embarcaciones, tanto con fines turísticos como particulares.

Además, en el tiempo que perduró la situación de emergencia, las autoridades lacustres de Villa La Angostura realizaron numerosas navegaciones de control y asistencia social para los

pobladores rurales del Perilago del Nahuel Huapi (**sección A3.3**), transportando personas y suministros básicos a bordo de guardacostas.

Los habituales recorridos lacustres que normalmente gestionaban los grandes catamaranes de Villa La Angostura, abocados a la movilización de personas desde y hacia Puerto Huemul, comenzaron a ser operados por otros proveedores particulares de servicios turísticos, a bordo de embarcaciones más pequeñas (**sección A5.3**).

Justamente, fue una de estas embarcaciones menores, que se encontraba navegando en los alrededores del Brazo Rincón (**Figura 1.13**) con 10 visitantes a bordo, que reportó haber atravesado unos delgados hilos de ceniza volcánica en flotación, formados en la desembocadura del arroyo *Cau Cau* frente al camping Florencia (**sección A3.2**). Inmediatamente después, la embarcación comenzó a experimentar fallos en el motor marítimos de intraborda, lo que culminó después con la pérdida total de funcionamiento del buque. Posteriormente pudo corroborarse que el fallo estuvo asociado a la obturación del circuito de refrigeración del motor marítimo con fragmentos pumíceos (**sección 3.2.6**). El incidente se produjo en agosto de 2019, varios años después de ocurrida la erupción volcánica del Cordón Caulle que cubrió la región con inmensos volúmenes de material de caída piroclástica (**sección 1.6.3**). Incluso, muchos pescadores y operarios de embarcaciones turísticas indican que en esta región es muy frecuente la formación de nuevas balsas de pómez flotante que ingresan al lago desde las desembocaduras de ríos y arroyos debido a la removilización fluvial de las extraordinarias acumulaciones de tefra depositada en las cuencas altas del sistema fluvio-lacustre, principalmente, después de eventos de precipitaciones intensas (**sección 3.4.1**).

Capítulo 3

Impactos de ceniza volcánica en el transporte naval

3.1. Marco de investigación

Las erupciones volcánicas explosivas representan una amenaza ampliamente reconocida para la aviación a nivel global, y la investigación sobre los efectos de la ceniza volcánica en las aeronaves se vio fuertemente impulsada, especialmente, después de los reconocidos incidentes que involucraron a los vuelos comerciales 009 de British Airways y 867 de KLM (Guffanti et al. 2010; Guffanti & Tupper 2015; Prata & Rose 2015).

El 24 de junio de 1982, un Boeing 747-226B con 263 personas a bordo experimentó un repentino fallo en sus cuatro motores propulsores al atravesar inadvertidamente una nube de ceniza volcánica, asociada a la erupción del volcán Galunggung (VEI: 4; Katili & Sudradjat 1984; Gourgaud et al. 2000). Afortunadamente, la aeronave pudo planear lo suficiente para evadir la nube de ceniza y reiniciar los motores, lo que permitió un aterrizaje de emergencia en el Aeropuerto de Yakarta, en Indonesia, sin heridos ni víctimas mortales.

Tan solo siete años después, el 15 de diciembre de 1989, otro incidente ocurrió cuando un Boeing 747-400 con 245 personas a bordo experimentó también el fallo de sus cuatro motores propulsores en su ruta hacia el Aeropuerto de Anchorage, en Alaska. Este incidente fue desencadenado al atravesar la nube de ceniza volcánica proveniente de la erupción del volcán Redoubt (VEI: 3; Miller & Chouet 1994; Scott & McGimsey 1994) del día anterior.

Afortunadamente, a lo largo de la historia, no se ha registrado ningún accidente que implicase la caída de una aeronave o fatalidades humanas como consecuencia directa de una erupción volcánica (Guffanti et al. 2010).

En contraste, la industria naval ha experimentado un número notable de incidentes con resultados diversos a lo largo de los últimos miles de años de historia, incluyendo la desaparición de puertos o buques con su tripulación a bordo. Pero, curiosamente, el conocimiento sobre la amenaza que representan las erupciones volcánicas para los sistemas de transporte naval sigue siendo extremadamente limitado.

3.1.1. Antecedentes

El recuento de erupciones volcánicas que han afectado puertos y embarcaciones es extenso e incluye una variedad de incidentes que van desde pequeños contratiempos como demoras o interrupciones del servicio, hasta casos de eventos catastróficos.

Posiblemente uno de los antecedentes más significativos sea la desaparición del buque japonés *Kaiyo-Maru Nro. 5* y sus 29 tripulantes a bordo en septiembre de 1952, mientras investigaba una erupción submarina a unos 400 km al sur de Tokio. Unos meses después, algunos restos de la embarcación hundida pudieron volver a ser hallados aún con fragmentos pumíceos incrustados en ella (Blong 1984).

En 1706, las coladas de lava generadas por la erupción de la Montaña Negra, también conocida como la *erupción de Trevejos*, sepultaron completamente la ciudad y puerto de Garachico de Tenerife, en las Islas Canarias. Esta erupción transformó el puerto más grande y concurrido de la isla en aquel entonces en un promontorio rocoso (Hulbert 1827).

Mejor suerte corrió la ciudad de Heimaey, en Islandia, durante la erupción del volcán Eldfell de 1973 (Blong 1984). Esto fue gracias a los operativos excepcionales que iniciaron las autoridades locales, en un intento de detener los flujos de lava que amenazaban con bloquear la entrada al puerto de Vestmannaeyjar mediante el bombeo de agua de mar. Estos operativos terminaron convirtiéndose en el programa más ambicioso jamás intentado por el hombre para controlar la actividad volcánica y minimizar el daño causado por una erupción (Williams & Moore 2008). Incluso, se consiguió mejorar las condiciones de la bahía, previo a la erupción, al proporcionar un refugio más seguro para las embarcaciones frente a las tormentas del Atlántico (Blong 1984).

En la Patagonia existen también numerosos casos de erupciones volcánicas explosivas afectando la navegación de los lagos de la región, algunos de los cuales se remontan incluso a más de cien años atrás (Petit-Breuilh 1995). Estos acontecimientos incluyen casos tan notables como el hundimiento de embarcaciones (Salgado et al. 2023) debido la acumulación de caídas de ceniza volcánica de hasta más de 170 milímetros de espesor (Villarosa & Outes 2013; Alloway et al. 2015), producto de la rememorada erupción del Cordón Caulle de junio de 2011; la desaparición de pequeños muelles de madera (Beigt et al. 2023) e incluso la destrucción total de puertos de mayor envergadura, como Pto. San Carlos, en la localidad de Bariloche (Villarosa et al. 2009; **sección 1.6.3**).

Notablemente, los efectos adversos de la ceniza volcánica sobre las embarcaciones han significado también el fracaso de numerosas acciones de respuesta naval a la emergencia (**sección 2.4.5; Anexo A**), y la removilización de los inmensos volúmenes de tefra que afectaron la región continúa significando un factor de peligrosidad para el transporte naval, incluso 12 años después de concluida la emisión de ceniza volcánica de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012.

Todos estos antecedentes, tanto a escala global como regional, han resaltado la profunda falta de conocimiento acerca de las características de vulnerabilidad de los sistemas de transporte naval frente a distintos tipos de peligros volcánicos. Las erupciones y caídas piroclásticas recientes

que afectaron el territorio patagónico andino (**sección 1.6**) representan entonces un escenario excepcional para evaluar este tipo de problemáticas.

3.1.2. Objetivos específicos

Con el fin de abordar esta falencia en el conocimiento, respecto a las características de vulnerabilidad de los sistemas de transporte naval frente a caídas de ceniza volcánica, en este capítulo se pretende:

- Identificar y relevar las consecuencias más significativas causadas por las caídas de ceniza volcánica de las erupciones de los volcanes Hudson de 1991, Chaitén de 2008, Cordon Caulle de 2011-2012 y Calbuco de 2015, en el ámbito naval de Patagonia andina.
- Sistematizar los impactos de las caídas primarias de ceniza volcánica en cada uno de los sistemas y elementos que componen un buque tipo.
- Sistematizar los impactos de *pumice rafts* (y otros peligros asociados a la presencia de ceniza volcánica en el agua) en cada uno de los sistemas y elementos que componen un buque tipo.
- Sistematizar los impactos de las caídas primarias de ceniza volcánica en distintos dominios portuarios.
- Sistematizar los impactos de *pumice rafts* (y otros peligros asociados a la presencia de ceniza volcánica en el agua) en los dominios *marítimos* del puerto.
- Evaluar otros tipos de peligros secundarios, así como sus impactos asociados, con el potencial de afectar en el transporte naval.
- Identificar y evaluar la efectividad de las distintas metodologías adoptadas para prevenir, mitigar y remediar los efectos negativos de la ceniza sobre puertos y embarcaciones.
- Investigar la posible relación existente entre los distintos grados de severidad de impactos observados y distintas medidas de intensidad de peligro.
- Explorar sobre las Escalas de Daño y Disrupción para impactos de caídas piroclásticas sobre sistemas de infraestructura crítica disponibles (Wilson et al. 2014a), con el fin de incorporar información empírica respecto al transporte naval.

3.1.3. Metodologías específicas

Las metodologías aplicadas (**sección 1.3**) para el relevamiento de datos de impactos y la elaboración del presente capítulo incluyeron:

- Visitas de reconocimiento a sitios afectados. Entre 2019 y 2020 se realizaron numerosas visitas de reconocimiento para la observación directa de impactos en sitios

afectados por caídas primarias de ceniza volcánica u otros peligros asociados. Estos sitios incluyen los puertos, muelles y marinas que se enumeran en la **Tabla 1.2** y otros sitios navegables afectados (**sección 1.4**).

- Reuniones y entrevistas de investigación con partes afectadas. Entre 2019 y 2022, se entrevistó a un total de 64 personas (n: 64) pertenecientes a 26 entidades u organizaciones diferentes (n: 26) con distintos tipos de injerencia en la navegación de los lagos de la región (*role-driven interviews*). En su amplia mayoría, las entrevistas se realizaron de forma presencial (en el sitio de los hechos, o en el lugar de trabajo del informante) y continuadas por telecomunicaciones cuando fuera posible o necesario. Las entrevistas fueron diseñadas en carácter semi-estructurado. En términos generales, el esquema estandarizado y preestablecido de temáticas a consultar refirió a las siguientes variables de observación: (1) descripción general de la situación en cada sitio, inmediatamente antes, durante y después de ser impactado por cada peligro volcánico; (2) datos específicos sobre los efectos directos de la ceniza en cada activo afectado, a corto, mediano o largo plazo; (3) identificación de características de diseño de cada sistema o elemento afectado que resultara particularmente vulnerable o resiliente a los efectos del peligro; (4) medidas adoptadas por adelantado o en respuesta a la crisis volcánica, incluidas las metodologías de limpieza aplicadas y remediación de sitios afectados; (5) fuentes de disrupción del transporte naval o logísticas portuarias; (6) lecciones aprendidas y mejoras incorporadas después de cada evento y, cuando corresponda, su eficacia demostrada en casos de experiencias reiteradas; y (7) impactos asociados a eventos de removilización fluvial y eólica de los depósitos de tefra.
- Inspecciones guiadas. Durante algunas reuniones y visitas de reconocimiento, se llevaron a cabo también inspecciones de algunos sistemas o elementos afectados por la ceniza volcánica, como maquinaria, equipamientos e infraestructura. Estas inspecciones estuvieron guiadas por los especialistas técnicos en mecánica o ingeniería naval correspondientes.
- Asesoramiento externo. Tanto el diseño de las entrevistas como el procesamiento de la información sobre impactos contaron con la asesoría de expertos técnicos en ciencias náuticas, ingeniería marítima y mecánica y arquitectura naval. Para la elaboración de esta sección, se contó con el consejo continuo de 3 especialistas externos a la navegación de los lagos patagónicos (**sección 5.2**).
- Determinación de medidas de intensidad del peligro. Los trabajos de campo también involucraron campañas de medición de espesores de caída piroclástica, efectuadas por investigadores del Grupo de Estudios Ambientales, GEA (IPATEC, CONICET/UNCO) durante las erupciones de los volcanes Chaitén de 2008, Cordón Caulle de 2011-2012 y Calbuco de 2015. Esto permitió obtener mediciones precisas de los espesores de caída de ceniza volcánica en cada sitio afectado.

3.2. Impactos en el buque

A continuación, se enumeran los principales tipos de impacto de ceniza volcánica, ya sea por caída primaria u otros peligros asociados a la presencia de ceniza en el agua, observados encada uno de los sistemas o elementos que conforman un buque tipo (**Tabla 3.1**).

3.2.1. Efectos de carga estática vertical

La acumulación de ceniza volcánica en la cubierta de las embarcaciones implica la generación de una carga vertical adicional que puede conducir a una variedad de consecuencias indeseadas en el buque.

Lógicamente, a medida que se incrementa la condición de carga de un buque, este se sumergirá más en el agua, lo que resultará en un aumento del calado medio, es decir, la distancia promedio entre la quilla del casco y la línea de flotación.

Ahora bien, una distribución asimétrica de cargas internas en el buque, causada por la acumulación, migración o remoción diferencial del depósito de ceniza en la cubierta, puede generar: (1) un *asiento* en el buque, es decir una inclinación de la embarcación respecto a su plano transversal; o (2) una *escora* en el buque, es decir una inclinación respecto a su plano longitudinal o de crujía. Estos cambios en las condiciones del buque resultan en aumentos del calado de proa, popa o asiento, según corresponda, y una disminución en la estabilidad del buque (Marzi & Broglia 2018; Wilson 2018).

La carga vertical asociada a un depósito de ceniza está determinada por varios factores. Esto incluye: (1) la densidad de sus materiales constituyentes; (2) la porosidad total del depósito, asociada al empaquetamiento entre los granos y la vesicularidad de los materiales juveniles (Estrada 2016; Landauer et al. 2020); y (3) la cantidad de agua que pueda alojarse en estos espacios vacíos (Williams et al. 2021; Osman et al. 2022). Es importante tener en cuenta que la saturación del depósito de ceniza con agua, producto de las precipitaciones o salpicaduras, puede incrementar la intensidad de la carga vertical en un 100% respecto al mismo depósito en seco (Macedonio & Costa 2012). Además, en condiciones invernales, la acumulación de nieve sobre o entre los bancos de tefra también puede incrementar la carga del depósito de ceniza acumulado en la cubierta de los barcos, especialmente en casos de erupciones prolongadas.

Todos estos factores son de vital importancia para evaluar los efectos de la carga estática en los buques de Patagonia, ya que los cuatro eventos de caída piroclástica en consideración ocurrieron durante la temporada invernal de lluvias y precipitaciones nivas.

Rompimiento de amarres

En muchos casos, el escorado de las embarcaciones amarradas en los muelles causó el rompimiento de cabos, amarres y cornamusas de embarcaciones menores y deportivas, e incluso en algunos buques de pasajeros de segunda (**Tabla 1.1**) en sitios donde se registraron espesores de caída de ceniza superiores a los 30 mm (p. ej., en los alrededores Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche).

Colapso de cabinas

También se ha observado que la carga asociada a acumulaciones moderadas de ceniza ocasionalmente causó el colapso de algunas cabinas de lona en embarcaciones menores y deportivas (**sección 3.2.2**).

Pérdida de estabilidad y maniobrabilidad

Durante la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012, muchos operarios en los alrededores de Villa La Angostura observaron que la acumulación de ceniza volcánica de hasta 170 mm de espesor (Villarosa & Outes 2013; Alloway et al. 2015) en la cubierta de embarcaciones menores y deportivas (**Tabla 1.1**) generaba un peligroso aumento de calado, comprometiendo su integridad estanca y dificultando la maniobrabilidad de las embarcaciones en aguas poco profundas.

Rolido y zozobrado

Quizás una de las consecuencias más significativas de las caídas piroclásticas en Patagonia sea el hundimiento o zozobrado de embarcaciones tan grandes como buques de pasajeros de primera (**Tabla 1.1**). Estos casos fueron únicamente registrados en la región noroeste del Lago Nahuel Huapi (p. ej., en el Mlle. Correntoso, el Pto. Modesta Victoria, y en Bahía Manzano; **Tabla 1.2**) durante la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 (**Figura 1.13**).

Sin embargo, es importante señalar que varios factores pueden contribuir al zozobrado de una embarcación (Belenky et al. 2019). Por ejemplo, normalmente, cualquier entrada excesiva de agua en los espacios estancos del buque suele ser evacuada mediante sistemas de achique. Estos sistemas son requeridos en todos los buques de pasajeros, independientemente de su tamaño (REGINAVE 2019), y generalmente son impulsados por generadores de emergencia.

No obstante, se ha observado que estos sistemas fallaban con frecuencia, ya sea debido al efecto directo de la ceniza volcánica o a los largos períodos de inoperatividad de la embarcación. Dado el limitado número de casos de estudio y la falta de precisiones empíricas adicionales, serían necesarias nuevas aproximaciones teóricas (como el modelado de curvas hidrostáticas, o curvas de atributos de carenas rectas; Belenky et al. 2019) para determinar si, efectivamente, la carga asociada a unos 150 mm a 170 mm de espesor de caída de ceniza volcánica sería suficiente para hacer zozobrar una embarcación por sí sola.

3.2.2. Daños en cubierta

La ceniza volcánica puede causar distintos tipos de daño y deterioro en cualquier superficie o equipamiento de cubierta expuestos a la caída de ceniza volcánica (**Figura 3.1**).

Daños abrasivos, corrosivos y deterioro de superficies

Uno de los impactos más frecuentemente reportados ha sido el daño abrasivo de la ceniza volcánica sobre las superficies de la cubierta. Por ejemplo, muchas estructuras y cabinas de madera en embarcaciones afectadas por la caída de ceniza necesitaron ser lijadas y pintadas nuevamente o incluso ser reemplazadas de forma parcial o total.

También se han registrado daños abrasivos en los vidrios de las distintas aberturas de las embarcaciones por acumulación de ceniza.

Por ejemplo, luego de la erupción del Calbuco de 2015, los vidrios parabrisas y las ventanas del *Catamarán José Julián* (Figura 2.5), un buque de pasajeros de primera (Tabla 1.1) que opera regularmente en Pto. Canoa (Tabla 1.2), debieron ser reemplazadas en su totalidad para poder retomar la navegación el verano siguiente.



Figura 3.1. Acumulación de ceniza volcánica en la cubierta de los grandes catamaranes de Pto. Pañuelo, durante la erupción del Cordón Caulle de 2011.

Para el caso de las superficies, estructuras y componentes metálicos, se ha observado que los daños abrasivos provocados por la ceniza estuvieron frecuentemente acompañados por cierto grado de corrosión acelerada, lo que requirió nuevamente del lijado, pintura e incluso reemplazo de los elementos dañados (Figura 3.2). Particularmente, se observó que muchos de los sistemas o componentes diseñados específicamente para la navegación marítima (p. ej., componentes cincados o galvanizados) presentaron un grado relativo de resiliencia, en comparación a otros elementos pintados de embarcaciones diseñadas para la navegación interna.

La acumulación de ceniza en cubiertas también ha causado otros tipos de deterioro en las superficies, como la podredumbre y el crecimiento de moho y hongos en estructuras de madera o fibra de vidrio, debido a la humedad contenida en el depósito de ceniza. Además, la ceniza volcánica ha generado otras problemáticas que dificultan la operatividad en cubierta, como lo han sido desarrollo de superficies resbaladizas, englamientos, el endurecimiento de cabos y cuerdas, los daños en cableados y cadenas, etc.

Impactos en equipamientos

En contraposición, han sido muy pocas las instancias en las que la caída de ceniza volcánica hubiera afectado equipamiento de cubierta, posiblemente debido a las restricciones para navegar en presencia de ceniza volcánica impuestas por las autoridades y otros esfuerzos de mitigación de daños (sección 3.5.1 a sección 3.5.2).



Figura 3.2. Ejemplo de delaminación de metales en componentes mecánicos de un motovelero del Club Náutico de Bariloche, a causa del daño corrosivo provocado por la ceniza volcánica.

Ocasionalmente, se ha reportado la contaminación de aceites combustibles y lubricantes con ceniza volcánica y la obturación de tomas de aire y filtros en equipos de cubierta.

Algunos de los expertos consultados discuten que la obturación de tomas y circuitos de aire en buques marítimos transoceánicos podría representar una problemática seria para tripulantes y pasajeros a bordo. Esto se debe a que en este tipo de embarcaciones se requiere mantener una presión positiva constante dentro de los distintos espacios confinados, a fin de evitar el ingreso de gases tóxicos en salas de control, de pasajeros, de máquinas y de carga.

3.2.3. Ingreso de ceniza en espacios confinados

La ceniza volcánica fina, ya sea de caída primaria o removilizada por el viento, puede ingresar fácilmente en los espacios confinados de las embarcaciones. Esto puede: (1) representar un riesgo para la salud de los tripulantes y pasajeros a bordo; (2) causar diversos tipos de daño físico en equipos y superficies expuestas; y (3) requerir esfuerzos de limpieza mucho más arduos.

Aunque el ingreso de ceniza en los interiores de las embarcaciones ha sido habitual, han sido pocas las ocasiones en que esto causara daños físicos significativos. Esto puede atribuirse a la inmediata interrupción de la navegación en presencia de ceniza volcánica y a los arduos esfuerzos por remover el material piroclástico del interior de las embarcaciones antes de retomar las actividades. En Pto. Canoa, por ejemplo (**Tabla 1.2**), donde las acciones de limpieza se vieron demoradas a causa de la ubicación remota del puerto, la ceniza volcánica fina causó estragos en las superficies expuestas de la cabina de pasajeros del *Catamarán José Julián* (**Figura 2.5**) durante la erupción del volcán Calbuco de 2015. Las superficies de madera del interior de la cabina debieron ser lijadas y repintadas, y la tapicería de los asientos quedó completamente arruinada, requiriendo su reemplazo total.

En algunos casos aislados, se ha reportado la contaminación de aceites combustibles y lubricantes en las salas de máquinas de buques de pasajeros de primera (**Tabla 1.1**).

Todos los operarios de las embarcaciones afectadas señalaron enfáticamente las dificultades asociadas a la limpieza de la ceniza fina acumulada en los interiores y equipamientos sensibles de la embarcación, antes de reiniciar la navegación (**sección 3.5**).

3.2.4. Daños en sistemas de energía, electrónica & computadoras

La ceniza volcánica puede causar una variedad de daños y desperfectos en los sistemas de generación, distribución y almacenamiento de energía eléctrica del buque, así como en equipos electrónicos y sistemas computarizados para la navegación y comunicación.

La contaminación con material particulado en los sistemas de energía eléctrica de los buques es una problemática frecuente en la navegación, principalmente marítima, causadas por fallos en los aisladores que producen cortocircuitos y fugas de energía (Taylor 1996). Dada la naturaleza conductiva de la ceniza volcánica en presencia de agua (Wardman et al. 2012a; **sección 1.5.3**) y las condiciones de humedad comúnmente imperantes en el ámbito naval, se esperaría que las caídas de ceniza volcánica tuvieran un extenso efecto negativo en los sistemas de generación,

distribución y almacenamiento de energía eléctrica de los buques, tal como se ha reportado para otras redes de suministro eléctrico (Wardman et al. 2012b; Wilson et al. 2012a; Wilson et al. 2014a).

Sin embargo, no se han reportado fallos eléctricos en los buques de Patagonia andina como resultado de las caídas de ceniza volcánica que afectaron la región. Los únicos inconvenientes registrados han sido los fallos ocasionales en el funcionamiento de los generadores eléctricos de emergencia, debido a la obstrucción de las tomas de aire, fallos eléctricos o largos periodos de desuso. Esta ausencia de impactos se atribuye nuevamente a la interrupción preventiva de la navegación impuesta por las autoridades, así como a diversos esfuerzos de prevención de daños, como la protección de equipos sensibles y la remoción total de la ceniza acumulada antes de reanudar la navegación (**sección 3.5**).

De manera similar, no se han registrado casos de caídas de ceniza volcánica que hayan afectado los diversos tipos de dispositivos electrónicos utilizados para el control de la navegación o las comunicaciones (Molland 2008), ya sea que estos estuvieran expuestos en la cubierta del buque (**sección 3.2.2**) o alojados en el interior de las cabinas (**sección 3.2.3**). Estos dispositivos responden generalmente a normas estrictas de estanqueidad para evitar ingreso de agua salada (REGINAVE 2019). Este aspecto de resiliencia de los dispositivos electrónicos para la navegación y la comunicación resultó ser un aspecto crítico en situaciones de emergencia, permitiendo la navegación en condiciones de visibilidad reducida (**Anexo A**).

En contraposición, los sistemas computarizados y centralizados para la navegación y la comunicación, cada vez más comunes en embarcaciones modernas de cualquier tamaño (Song & Panayides 2015), resultaron ser especialmente vulnerables a los efectos de la ceniza volcánica. Estos fallos ocasionaron incidentes extremadamente peligrosos durante intentos de evacuación y rescate de pobladores rurales a bordo de guardacostas, causando daños irreparables en el buque (**sección A 2.3.1**). La ceniza volcánica puede afectar diversos componentes o elementos de un sistema computarizado mediante diversos mecanismos, lo que incluye oclusiones, daños abrasivos, corrosivos y fallos eléctricos (Gordon et al. 2005; Wilson et al. 2012a; Wilson et al. 2014a), los cuales lamentablemente no pudieron ser especificados en los casos de estudio relevados en Patagonia.

3.2.5. Pérdida de visibilidad, navegabilidad & posicionamiento

La ceniza volcánica puede causar interrupciones significativas y duraderas en la funcionalidad del transporte naval debido a varios factores, incluyendo la pérdida de la visibilidad, la navegabilidad y el posicionamiento.

Visibilidad atmosférica

Es ampliamente reconocido que la concentración de ceniza volcánica en el aire puede disminuir la visibilidad atmosférica, ya sea por la caída directa o por la resuspensión eólica de ceniza, creando dificultades para el transporte (p. ej., Guffanti et al. 2009; Wilson et al. 2014a; Blake 2016; Blake et al. 2017a, 2018).

En la Patagonia, las condiciones de visibilidad atmosférica reducida no sólo dificultaron la navegación, sino que también causaron problemas de accesibilidad y operatividad en los sitios portuarios (p. ej., **sección A.3.4; A3.5; y A4.1**).

Visibilidad en el agua

Además de la visibilidad atmosférica, es necesario considerar la disminución de la visibilidad debido a la presencia de ceniza volcánica en el agua. La ceniza puede cubrir extensas áreas de superficie de los lagos, líneas de costa, promontorios rocosos e incluso boyas y señalizaciones. En la Patagonia, las condiciones de navegabilidad deterioradas por la ceniza volcánica en el agua no sólo limitaron un gran número de operativos de respuesta a la emergencia (**Anexo A**), sino que también provocaron algunos incidentes en sitios portuarios, costosos de remediar.

Por ejemplo, en Pto. Pañuelo (**Tabla 1.2**), la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 causó un fuerte deterioro en las condiciones de maniobrabilidad de las embarcaciones en la bahía portuaria, debido al ingreso de inmensos *pumice rafts* (**sección 3.3.3**) y a problemáticas de sedimentación asociadas (**sección 3.3.5**). Durante los años que siguieron a la erupción, dos buques de pasajeros de primera, el *Modesta Victoria* y el *Gran Victoria* (**Tabla 1.1**), estrellaron sus hélices contra el fondo rocoso de la bahía debido a estas dificultades para la maniobrabilidad y a las persistentes obras de remediación en el puerto (**sección 3.5**) que obstaculizaban el tráfico de las embarcaciones. Estos incidentes obligaron a retirar las embarcaciones del agua para su reparación, lo que ocasionó pérdidas económicas significativas para una de las empresas de turismo lacustre más grandes de la región.

Atenuación de señales

Al igual que las tormentas de polvo (Saleh & Abuhdima 2011), las caídas de ceniza volcánica pueden ser un factor de atenuación de señales (Wardman et al. 2012b; Wilson et al. 2012a; Cragg 2022) causando la pérdida de las comunicaciones y del posicionamiento. Sin embargo, los registros de estos antecedentes son escasos e inconsistentes, tanto en los casos de estudio abordados en este capítulo (Salgado et al. 2023) como en otros contextos globales (Wilson et al. 2012a; 2014a).

Hildreth y Fierstein (2012), por ejemplo, describen cómo las comunicaciones radiales fueron totalmente interrumpidas por efecto de la emisión de ceniza volcánica durante la erupción del Novarupta-Katmai en 1912. En contraste, las comunicaciones radiales de tipo VHF y UHF resultaron ser los medios más efectivos durante la emergencia de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012, debido a los problemas de sobrecarga experimentados por los sistemas de telefonía celular en la región Patagónica (Wilson et al. 2013). Por otro lado, Cragg (2022) discute cómo la potencia de la señal satelital para el posicionamiento podría verse afectada si las antenas GPS de las embarcaciones se cubren con ceniza volcánica húmeda.

3.2.6. Obturación & daño en sistemas de refrigeración

La ceniza volcánica en el agua, ya sea en flotación, suspensión o removilizada por distintos agentes, puede rápidamente obturar y dañar cualquier sistema del buque con tomas de *agua de mar*, incluyendo turbinas (**sección 3.2.8**) y los distintos sistemas de refrigeración del motor marítimo. Los desperfectos causados por la obturación y/o el daño en los sistemas de refrigeración

de los motores marítimos representan uno de los impactos más comúnmente reportados en todo tipo de buques motorizados. Esta problemática ha sido amplia y frecuentemente documentada tanto en la Patagonia (Salgado et al. 2022, 2023) como en muchos otros sitios previamente afectados por caídas piroclásticas (Blong 1984; Wilson et al. 2012a; Wilson et al. 2014a; Blake 2016). Entre los casos de estudio analizados, la repentina y terminante pérdida de funcionalidad de los motores marítimos a causa de este tipo de impacto ha representado una seria amenaza para la seguridad de las tripulaciones que navegaron desprevenida-mente en aguas contaminadas con ceniza.

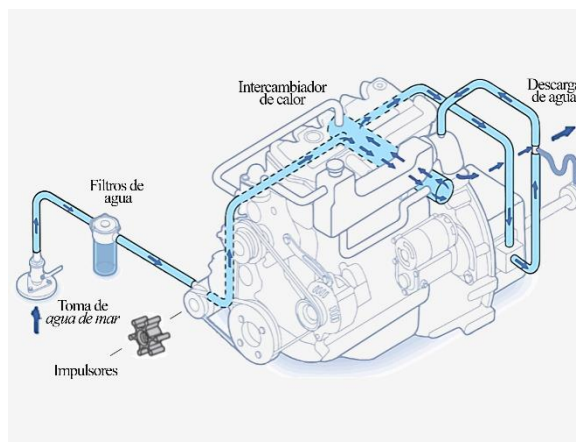


Figura 3.3. Diagrama esquemático de un motor diésel marino, que ilustra el patrón de circulación del *agua de mar* a través de un sistema de refrigeración de tipo abierto.

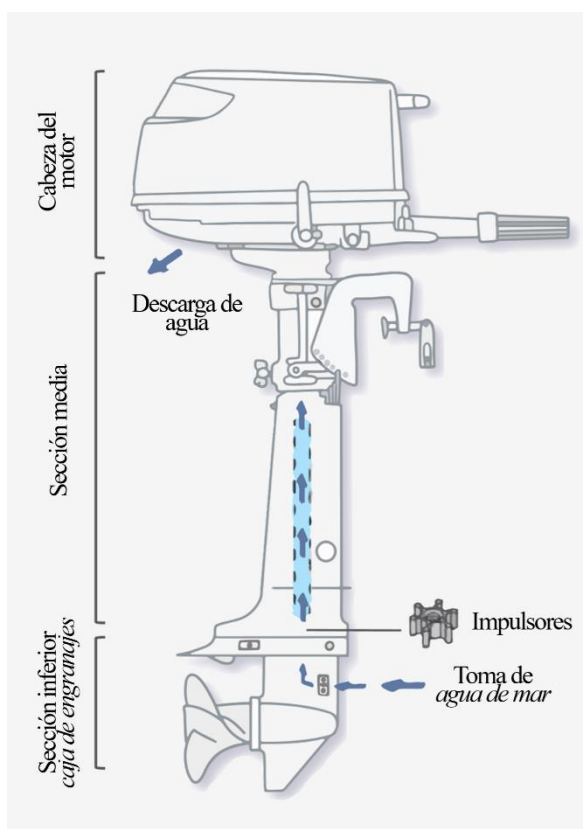


Figura 3.4. Diagrama esquemático de un motor tipo fuera de borda, que ilustra el patrón de circulación del *agua de mar* a través del sistema de refrigeración.

Todos los *motores de combustión interna*, incluidos los *motores diesel* comúnmente utilizados en náutica, requieren de ciertos mecanismos de refrigeración que permitan disminuir el calor generado por la quema del carburante y mantener cierto rango de temperatura óptimo para el funcionamiento del motor. Este rango de temperatura garantiza que los componentes metálicos del motor preserven sus propiedades mecánicas y se eviten daños por fricción, deformación o detonaciones prematuras del combustible (Molland 2008; Woodyard 2009; Latache 2021).

Existen diversos tipos de sistemas de refrigeración de motores marítimos (Molland 2008; Woodyard 2009). La mayor parte de los buques oceánicos modernos operan con un sistema centralizado de refrigeración que utiliza el *agua de mar* para enfriar un suministro de líquidos refrigerantes, que son a su vez recirculados por bombas centrífugas a través de distintos pasajes internos del motor y cualquier otro sistema que requiera refrigeración. Este

tipo de circuito minimiza el contacto directo del agua de mar con los distintos componentes de motor, evitando problemas de corrosión y contaminación.

En cambio, en grandes embarcaciones diseñadas específicamente para la navegación interna (**Figura 3.3**), o en motores fueraborda de embarcaciones más pequeñas (**Figura 3.4**), existen sistemas abiertos que bombean el *agua de mar* directamente a través del motor, para luego descargarla fuera de la borda del buque.



Figura 3.5. Fragmentos pumíceos atascados en la toma de *agua de mar* del fueraborda *Tsunami* tras una salida de campo en el noroeste del Lago Nahuel Huapi en octubre de 2021, una década después de la erupción del Cordón Caulle.



Figura 3.6. Limpieza de los filtros del sistema de refrigeración del motor marítimo, obstruidos con material pumíceo, en un buque de pasajeros de primera.

impidiendo su ingreso en el circuito (**Figura 3.5**). Los fragmentos de ceniza más finos pueden sortear los filtros de rejilla de la toma de agua y obturar y dañar pasajes y componentes internos del circuito de refrigeración, dificultando las tareas de limpieza, mantenimiento o reparación y reemplazo (**Figura 3.6**).

En Patagonia, este tipo de impacto ha sido verificado en casi todos los sitios navegables afectados por ceniza volcánica (**Tabla 3.1**). En Pto. Pañuelo (**Tabla 1.2**) por ejemplo, los inmensos volúmenes de ceniza en el agua que alcanzaron la bahía portuaria y sus alrededores durante la erupción de 2011 fueron suficientes para colmatar los filtros externos e internos de

los buques de pasajeros de primera que operan allí. Los fragmentos de ceniza más finos obturaron los pasajes internos más refinados de los sistemas de refrigeración más sofisticados de grandes embarcaciones. El daño abrasivo causado por la ingesta de ceniza fue suficiente para destruir los rotores de goma del circuito y dañar bombas de bronce (**Figura 3.7**).

Una característica de resiliencia interesante, identificada en los sistemas de refrigeración de estos grandes buques, consiste en la posibilidad de puentear circuitos de refrigeración paralelos, permitiendo a los operarios realizar tareas de limpieza y mantenimiento en una de las ramas del circuito mientras la otra permanece en funcionamiento, sin necesidad de detener la circulación de agua. Esta característica de redundancia en el diseño del sistema puede representar un rasgo de resiliencia importante para buques oceánicos que naveguen desprevenidamente en aguas contaminadas con ceniza volcánica.

Una peculiaridad importante es que este tipo de impacto ha perdurado mucho tiempo después de que finalizara la emisión de ceniza volcánica. Esto se asocia a la removilización de la ceniza volcánica depositada en el lecho de las bahías portuarias como consecuencia del tránsito de las embarcaciones (**sección 3.3.5**) o por la removilización fluvial de los depósitos de tefra en cuencas fluvio-lacustres de Patagonia, un fenómeno que ha sido observado incluso décadas después de finalizada la erupción volcánica (**sección 3.4.1**). También se ha observado que la deriva de grandes volúmenes de ceniza en flotación a través de los lagos y los ríos ha ampliado considerablemente la huella de afectación del peligro asociado a la caída primaria de ceniza volcánica (**sección 3.4.1**).

Algunos de los operarios y expertos consultados discuten que, para el caso de las embarcaciones menores y deportivas con motores fueraborda (**Tabla 1.1**), el diseño de la parte inferior del motor podría constituir un factor de resiliencia. Los respondientes involucrados en los



Figura 3.7. Ejemplo de un motor diésel marino en el barco *Modesta Victoria*, y detalle de un rotor de goma interno (intacto) del sistema de refrigeración del motor, erosionados por el efecto abrasivo de la ceniza volcánica ingerida por el sistema.

operativos de rescate de pobladores del *Perilago* (**sección A3.3.1**), interpretan que el diseño elongado de la *pata* que compone la sección inferior del motor fueraborda (**Figura 3.4**) podría haber contribuido a la resiliencia de uno de los guardacostas involucrados en este operativo, al sumergir más profundamente la toma de agua del circuito de refrigeración, por debajo de la masa flotante de *pumice rafts*.

Las medidas de prevención y mitigación adoptadas por los operarios de embarcaciones para evitar este tipo de impacto fueron intuitivas y sumamente variadas, obteniendo distintos grados de éxito (**sección 3.5**).

Los expertos consultados en el tema también discuten que la presencia de ceniza volcánica en el agua podría adicionalmente afectar a los numerosos sistemas de las embarcaciones mayores (incluso en buques transoceánicos) que también dependen de la toma de *agua de mar*, como lo son los servicios de agua sanitaria y los sistemas de lucha de incendios, lastre, baldeo, etc.

3.2.7. Daños en sistemas de propulsión & transmisión

La presencia de ceniza volcánica en el agua, ya sea en flotación, suspensión o removilizada por distintos agentes, también puede causar distintos tipos de daños abrasivos y corrosivos en los elementos sumergidos de los *sistemas de propulsión y transmisión* del buque.

Un *sistema de propulsión* está compuesto por un conjunto de elementos que permiten el desplazamiento de la embarcación sobre el agua, transformando la energía generada por el motor marítimo en una fuerza de avance. Entre los tipos de propulsores más comúnmente utilizados en embarcaciones modernas se encuentran las diversas variedades de hélices, dispositivos mecánicos conformados por un conjunto de palas concéntricas, o álabes, montadas sobre un eje rotativo (Molland 2008; Woodyard 2009; Carlton 2018). Estas palas, al girar, generan una fuerza de empuje por aceleración del flujo de agua que impulsa la embarcación hacia adelante.

Otra forma común de propulsión son las turbinas, o *waterjets*, las cuales también pueden verse afectadas por la presencia de ceniza volcánica en el agua, pero se analizan de manera separada más adelante (**sección 3.2.8**)

La energía mecánica rotativa generada en el motor marítimo se transfiere a las hélices del buque mediante el *sistema de transmisión*. En embarcaciones menores fueraborda, este sistema está integrado a la estructura propia del motor, mientras que, en embarcaciones mayores con motores internos, la transmisión puede ser mucho más compleja y variada. Frecuentemente, la transmisión está compuesta por un sistema de ejes interconectados fijados al casco por una serie de piezas cilíndricas, o bujes. Estos permiten la sujeción y rotación de los ejes y transfieren la fuerza generada por la hélice a la caja de empuje y el casco del buque.

En algunas embarcaciones mayores de Patagonia, diseñadas específicamente para la navegación interna, parte del sistema de transmisión se encuentra sujeto a la parte inferior y externa del casco, sumergida en el agua, la cual actúa como un agente natural de lubricación y refrigeración para los ejes en rotación.

En Patagonia, se han registrado numerosos daños abrasivos y corrosivos en los elementos móviles sumergidos de los sistemas de propulsión y transmisión en contacto con la ceniza volcánica. Uno de los ejemplos más significativos está representado por los impactos que se observaron sobre las embarcaciones mayores que operan en Pto. Pañuelo (**Tabla 1.2**). Durante la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012, y presumiendo los posibles impactos de los grandes volúmenes de ceniza que ingresaban a la bahía, se llevó a cabo una inspección subacuática extraordinaria por medio de buzos especializados, con el propósito de evaluar el estado de los sistemas de propulsión y transmisión de las embarcaciones. Esta inspección atípica resultó satisfactoria y facultó la posibilidad de continuar la navegación en la zona.

Sin embargo, durante la siguiente inspección de rutina realizada en el *Catamarán Victoria Andina* el año siguiente, de manera emergida, se pudo verificar un inmenso desgaste sobre los bujes helicoidales de goma del sistema de transmisión de la embarcación, muy por encima de los umbrales de desgaste aceptados para la navegación (**Figura 3.8**). Este mismo tipo de impacto pudo ser rápidamente identificado en otras tres embarcaciones mayores de Pto. Pañuelo, las cuales requirieron un reemplazo total y no programado de bujes. Es importante destacar que las inspecciones necesarias para identificar estos impactos representan procedimientos complejos y costosos y que, sin una atención adecuada, estos desgastes pueden derivar en problemas adicionales mucho más severos y costosos.

Los operarios de las embarcaciones e interventores de la inspección atribuyen este desgaste extremo al constante efecto abrasivo de la ceniza en el agua del lago, que actúa como lubricante y refrigerante del buje. Según los consultados, el retraso y la persistencia de este tipo de impacto se deben a la perdurable removilización de la ceniza volcánica depositada en el lecho de la bahía del puerto, producto del tráfico continuo de las embarcaciones (**sección 3.3.5**).



Figura 3.8. Detalle de los bujes helicoidales de goma en los ejes de cola del sistema de transmisión de una embarcación, corroídos por efecto de la ceniza volcánica en el agua.

También se identificaron daños abrasivos y corrosivos menores en otros elementos móviles sumergidos de los sistemas de transmisión y propulsión de las otras cinco embarcaciones mayores que operan desde este puerto.

Es importante destacar que las inspecciones necesarias para identificar tales impactos representan procedimientos complejos y costosos que deben realizarse en embarcaciones retiradas del agua o recurriendo a buzos especializados y que, sin la atención adecuada, estos desgastes pueden derivar en problemáticas adicionales mucho más severas.

Un ejemplo de diseño de sistema resiliente a este tipo de impacto estuvo figurado en la emblemática embarcación *Modesta Victoria*, un buque insignia de pasajeros de primera diseñado para la navegación marítima que opera en Lago Nahuel Huapi desde 1938. En este caso, los cojinetes de los bujes de la nave están fabricados con *metales blancos*, aleaciones de metales claros a base de estaño, plomo y cobre, que resultaron ser totalmente resistentes a los efectos abrasivos de la ceniza volcánica en el agua.

Los expertos consultados en el tema discuten que la presencia de ceniza volcánica en el agua también podría dañar la integridad mecánica de otros tipos de sistemas con componentes móviles sumergidos en buques oceánicos.

3.2.8. Obturación & daño en turbinas

La navegación en aguas contaminadas con ceniza volcánica puede causar la obturación de las tomas de *agua de mar* y distintos daños mecánicos en los sistemas de propulsión a turbina, dejando a las embarcaciones prácticamente inoperables de manera casi inmediata.

Las *turbinas* o *waterjets* (Figura 3.9), sistemas de chorro de agua, son sistemas de propulsión especializados que se utilizan en situaciones donde otras formas de propulsión encuentran dificultades, por ejemplo, debido a limitaciones de inmersión y calado. Aunque son comunes en embarcaciones menores y deportivas (Tabla 1.1), su aplicación en embarcaciones mayores y modernas es cada vez más frecuente (Carlton 2018).

Estos sistemas de propulsión funcionan acelerando un flujo de agua para obtener un trabajo y generar movimiento. El sistema toma grandes volúmenes de *agua de mar* a través de

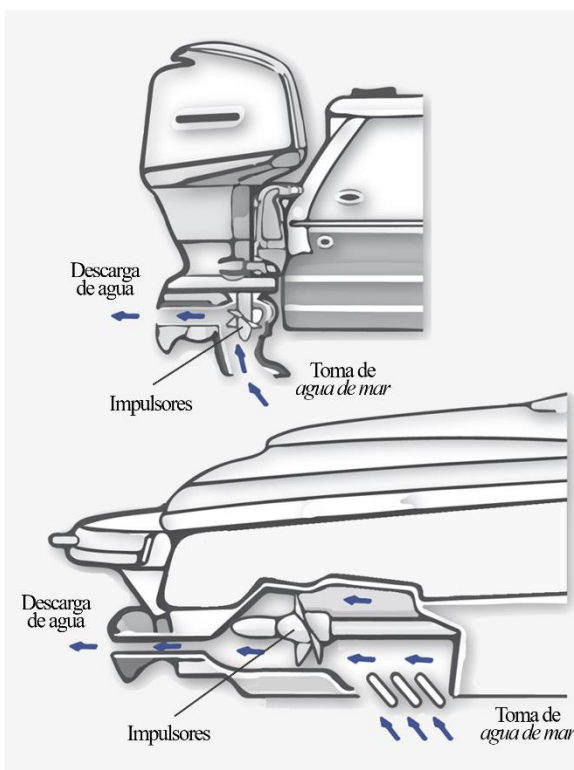


Figura 3.9. Diagrama esquemático de un sistema de propulsión a turbina, o *waterjet*, en motores de tipo fueraborda (arriba) e intraborda (abajo).

tomas ubicadas en la parte inferior del motor fueraborda, o en la parte inferior del casco en embarcaciones intraborda. El agua es acelerada mediante un impulsor (de tipo émbolo, bomba centrífuga o bomba axial) y luego es expulsada como un chorro por el extremo posterior de la turbina, impulsando la embarcación hacia adelante. El agua es expulsada a través de una tobera que reduce la sección de salida, aumentando la presión y la velocidad del chorro de agua. Esta tobera es orientable, permitiendo la maniobrabilidad de la embarcación (Molland 2008; Woodyard 2009; Carlton 2018).

Debido a los grandes volúmenes de agua que se utilizan, la navegación en aguas contaminadas con ceniza volcánica puede causar una variedad de impactos en diferentes secciones del sistema de turbina. Al igual que para otros sistemas con tomas de *agua de mar*, los fragmentos más gruesos de ceniza volcánica pueden obstruir rápidamente las tomas y los conductos de agua, impidiendo el ingreso de esta en el circuito. Además, la ceniza también puede dañar las partes móviles de los impulsores o formar masas compactas y endurecidas en los circuitos internos, difíciles de remover.

En la Patagonia, si bien existen algunos antecedentes de turbinas arruinadas por efecto de la ceniza volcánica (**Anexo A**), afortunadamente, el uso de este tipo de sistema de propulsión fue preventivamente evitado, por sentido común, por parte de los respondientes en situaciones de emergencia.

3.2.9. Abrasión, corrosión & crecimientos algales acelerados en cascos

La navegación en aguas contaminadas con grandes cantidades de ceniza volcánica puede acelerar e intensificar el deterioro de la obra viva del casco, así como el de cualquier otra superficie del buque (o infraestructura portuaria) en contacto con el agua.

El desgaste y deterioro de la superficie externa de los cascos es un fenómeno habitual en los buques, asociado a múltiples causas. Un mantenimiento adecuado favorece una navegación más eficiente y evita daños más extendidos e incluso irreparables (Molland 2008).

Sin embargo, dada la naturaleza abrasiva de los fragmentos pumíceos, el tránsito frecuente de las embarcaciones a través de grandes volúmenes de ceniza en flotación puede causar un desgaste erosivo en la superficie del casco, el cual puede estar acompañado por daños abrasivo-corrosivo en cascos con estructuras metálicas.

En Pto. Pañuelo, por ejemplo (**Tabla 1.2**), donde el ingreso de grandes volúmenes de ceniza volcánica a la bahía perduró durante semanas, se identificó una formación inusual de marcas erosivas, significativamente profundas, hacia la *roda* del casco, justo por encima del nivel de flotación del buque donde rompe el oleaje. Los operarios consultados atribuyen este desgaste a la fricción causada por el tránsito frecuente de los buques a través de los inmensos *pumice rafts* que se aglomeraban en las inmediaciones del puerto, con dimensiones muy superiores a los 35 cm de espesor.

Por otra parte, los crecimientos algales e incrustaciones formadas en los cascos también pueden interferir en el desempeño hidrodinámico del buque, comprometer el funcionamiento de piezas sumergidas móviles, tomas de *agua de mar* y acentuar los procesos naturales de desgaste abrasivo-corrosivo (Molland 2008). En la Patagonia, los eventos de caída de ceniza volcánica han sido frecuentemente vinculados a crecimientos algales extremadamente acelerados en muchos lagos de la región (p. ej., Modenutti et al. 2013), causando la formación de bioincrustaciones en los cascos de múltiples embarcaciones y requiriendo esfuerzos de mantenimiento más intensivos.

3.3. Impactos en el puerto

A continuación, se enumeran los principales tipos de impactos de ceniza volcánica, ya sea por caída primaria u otros peligros asociados a la presencia de ceniza en el agua, observados en cada una de las zonas o *dominios* que conforman un sitio portuario (**Tabla 3.1**).

3.3.1. *Disrupción de operatividades*

La caída y acumulación de ceniza volcánica en las zonas terrestres (*land-side domain*) y de evacuación (*evacuation domain*) del puerto pueden provocar interrupciones significativas en su funcionalidad debido a varios factores: (1) disrupción de las vías de acceso; (2) disrupción de los servicios de infraestructura crítica en el puerto; (3) riesgos para la salud de los operarios; (4) necesidad de limpieza, mantenimiento y remediación del puerto y las embarcaciones; u (5) otras dificultades que afecten las operaciones habituales como la reducción de la visibilidad atmosférica reducida, la formación de superficies resbalosas, engelamientos, etc.

Entre los estudios de caso analizados, se ha observado que caídas piroclásticas de apenas unos pocos milímetros de espesor (**Tabla 3.1**) han sido suficientes para afectar la funcionalidad de algunos puertos durante largos periodos de tiempo.

Por ejemplo, durante la erupción del volcán Calbuco de 2015, la acumulación de ceniza fina sobre la ruta provincial 61 (**Figura 1.14**) dificultó el acceso vehicular a Pto. Canoa (**Tabla 1.2**) por varios días consecutivos. Estas dificultades para acceder al pequeño y remoto muelle turístico retrasó significativamente las tareas de despeje de ceniza y el mantenimiento de las infraestructuras edilicias, el *Catamarán José Julián* (**Figura 2.4; Figura 2.5**) y otras embarcaciones menores que operan en la zona.

Una situación similar se observó en Villa Traful (**Figura 1.13**) durante la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012. La persistente caída y acumulación de ceniza sobre la Ruta Provincial 65 impidieron la movilización de los recursos necesarios para iniciar las tareas de despeje en Pto. Traful (**Tabla 1.2**) y el resto de la localidad, lo que provocó un retraso de varios meses en el comienzo de las labores. Al mismo tiempo, las persistentes interrupciones en los servicios de infraestructura crítica (Wilson et al. 2013) también dificultaron el acceso y la operatividad en varios puertos del sur y noroeste del Lago Nahuel Huapi.

De manera similar, las caídas de entre 2 mm y 17 mm de espesor de ceniza volcánica muy fina en la región sur del Parque Nacional Los Alerces (**Figura 1.12**), durante la erupción del Chaitén de 2008, también dificultaron el retorno de los autoevacuados al lugar y retrasaron el inicio de las tareas de despeje de ceniza hasta el verano siguiente.

3.3.2. Daños en maquinaria & infraestructura

La caída y acumulación de ceniza volcánica en la zona terrestre del puerto (*land-side domain*) pueden causar una variedad de daños físicos en maquinaria e infraestructura expuesta, ya sea por el efecto abrasivo y corrosivo de la ceniza volcánica, o por la carga estática vertical del depósito.

Los muelles y embarcaderos, debido a su estructura horizontal, plana y amplia, son particularmente propensos a la acumulación de ceniza volcánica. Sin embargo, y a diferencia de lo observado en muchas edificaciones alrededor de Villa La Angostura, donde caídas de ceniza de hasta 170 mm de espesor causaron colapsos de techos (Wilson et al. 2013), no se han registrado impactos significativos en la infraestructura de los puertos, debido al efecto de la carga estática vertical del depósito de tefra. Esto no ocurrió ni siquiera en pontones o muelles flotantes, estructuras con menor resistencia a cargas adicionales, o en sitios remotos con poco mantenimiento.

El deterioro de superficies expuestas se limitó a algunos daños leves, pero muy ampliamente extendidos (**Tabla 3.2**). Los impactos incluyeron: (1) el deterioro de estructuras y edificaciones de madera, las cuales requirieron de lijado, pintura e incluso, en algunos casos, reemplazo; (2) la abrasión y corrosión acelerada en algunos elementos o componentes metálicos, requiriendo pintura o reemplazo; y (3) la abrasión de los vidrios de algunas aberturas.

Los impactos de la ceniza sobre la maquinaria resultaron ser mucho más severos, pero estuvieron limitados a los pocos sitios portuarios que utilizan este tipo de equipos para el manejo de buques, cargas y pasajeros.

El Club Náutico de Bariloche (**Tabla 1.2**), por ejemplo, ofrece una multiplicidad de servicios especializados para cientos de embarcaciones de diversos tipos. En este lugar, la caída de ceniza volcánica del Cordón Caulle de 2011-2012 afectó varias grúas, tractores y un ascensor de embarcaciones que se utilizan para la varada y botadura de buques. Estos equipos requirieron una limpieza exhaustiva e incluso el reemplazo de varios componentes mecánicos móviles, los cuales afectados por la caída de ceniza volcánica.

3.3.3. Ingreso de pumice rafts en bahías

Las caídas de grandes volúmenes de ceniza volcánica en el agua pueden generar *pumice rafts* de hasta varias decenas de centímetros de espesor, los cuales pueden permanecer en flotación durante varias semanas y ser movilizados por acción del viento y las corrientes. Estas masas de pómez flotante pueden ingresar a bahías portuarias (*sea-side domains*) u otros sitios críticos y causar distintos tipos de daño y interrupción.

Su acumulación en zonas de atraque, permanencia y fondeo del puerto aumenta el riesgo de obturación y daño en sistemas con tomas de *agua de mar* de las embarcaciones (**sección 3.2.6**; **sección 3.2.8**) o en sistemas con partes móviles sumergidas (**sección 3.2.7**).

Además, dificultan la maniobrabilidad de las embarcaciones al disminuir la visibilidad por presencia de ceniza en la superficie del agua y el sepultamiento de la línea de costa, playas, rampas, bajadas de lanchas, promontorios rocosos, señalizaciones, etc. Este fue el caso particular de muchos sitios ubicados sobre la costa sur del Lago Nahuel Huapi, tras la erupción del Cordón Caulle de 2011-

2012 (**Figura 1.13**). Durante los primeros días de la erupción, las caídas de entre ~ 35 mm y 50 mm de ceniza volcánica media a gruesa formaron una delgada capa de material en flotación que cubrió por algunos días la superficie del agua. Sin embargo, los vientos predominantes del noroeste arrastraron mayores volúmenes de fragmentos pumíceos flotantes más gruesos hacia esta región, agravando las condiciones de navegabilidad en lugares como Pto. Pañuelo, el Club Náutico de Bariloche y Pto. San Carlos (**Tabla 1.2**).

En Pto. Pañuelo, por ejemplo, los *pumice rafts* ingresaron de lleno en la bahía natural y abierta donde se asienta el puerto, cubriendo por completo la superficie del agua y acumulándose principalmente en su parte más interna. Los operarios del puerto estimaron que estas balsas de pómez superaban ampliamente los 35 cm de espesor en promedio, al introducir una barra de metal a través del material flotante y contactar la superficie del agua subyacente. Notoriamente esta misma barra de metal podía descansar su propio peso sobre el material pumíceo flotante al apoyársela de forma horizontal sobre los pumice rafts (**Figura 3.10**). Si bien se intentó detener el masivo ingreso de pómez a Pto. Pañuelo, todos los esfuerzos resultaron ser completamente en vano (**sección 3.5.5**).

En Pto. San Martín (**Tabla 1.2**) se observaron fenómenos muy similares durante las erupciones de 2011-2012 y 2015, debido al efecto de los vientos del oeste y la ubicación a sotavento del puerto en el Lago Lácar (**Figura 1.14**). Y lo mismo para los numerosos puertos que se emplazan en las costas orientales de los lagos del Parque Nacional Los Alerces (**Figura 1.12**). Sin embargo, en estos sitios, no se registraron impactos significativos como consecuencia del ingreso de *pumice rafts* (**Tabla 3.2**).



Figura 3.10. Operarios en Pto. Pañuelo durante la erupción del Cordón Caulle de 2011, haciendo descansar una barra metálica en la superficie de los más de 35 cm de espesor de material pumíceo en flotación que ingresó a la bahía portuaria.

Razonablemente, todos los puertos ubicados en bahías naturales al abrigo del viento resultaron menos afectados por este fenómeno. En el Lago Traful, por ejemplo, las caídas piroclásticas de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 de hasta más de 50 mm de espesor, generaron grandes masas de *pumice rafts* que fueron rápidamente arrastradas por el viento hacia la embocadura en el río Traful (**Figura 1.13**). De la misma forma, cualquier material en flotación que se formara por caída directa en la bahía de Pto. Traful (**Tabla 1.2**) también fue despejada rápidamente por la misma acción del viento.

Notoriamente, las obras de abrigo en bahías naturales o artificiales, como los rompeolas, obstaculizaron y minimizaron de forma evidente el ingreso de *pumice rafts* a los sitios portuarios. Estas estructuras también posibilitaron la implementación de estrategias para detener o manejar los ingresos de ceniza al puerto (**sección 3.5.5**). En el Club Náutico de Bariloche, por ejemplo, un rompeolas de material de 200 m de longitud orientado hacia el este obstaculizó el ingreso de *pumice rafts* al interior de la dársena, y facilitó la instalación transitoria de barreras de flotadores en la bocana de la marina. En Pto. San Carlos, también emplazado al abrigo de un rompeolas de concreto en forma de "L" que se extiende hacia el este, los vientos predominantes del oeste también favorecieron el despeje de los *pumice rafts* que se formaban por caída directa en las dársenas.

3.3.4. Engelmiento de *pumice rafts*

En regiones con climas especialmente fríos, las bajas temperaturas pueden llegar a congelar las masas húmedas de pómez en flotación, o incluso los depósitos de ceniza volcánica acumulados en las costas, formando masas consolidadas y difíciles de manipular. El engelmiento de los *pumice rafts* puede dificultar la maniobrabilidad de las embarcaciones dentro la bahía, impedir su despeje o remoción e incluso atascar pequeñas embarcaciones u otros artefactos navales.

En la Patagonia, el congelamiento de *pumice rafts* resultó ser un fenómeno poco frecuente pero notablemente disruptivo. En la Represa Hidroeléctrica de Alicurá (**Figura 1.13**), por ejemplo, el congelamiento recurrente de los inmensos volúmenes de *pumice rafts* generados por la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012, y transportados por el Río Limay hasta la represa (**sección 3.4.1**), obstaculizó significativamente los intentos de encausar el material pumíceo mediante barreras de flotadores (**sección 3.5.5**) hacia el aliviadero de la represa, lejos de la toma de agua de las turbinas.

En Pto. Pañuelo (**Tabla 1.2**) el congelamiento de *pumice rafts* de más de 35 cm de espesor fue suficiente para atascar pequeñas embarcaciones de servicio, amarradas en la parte más interna de la bahía. Estas embarcaciones tuvieron que ser liberadas mediante el uso de picos y palas para romper la capa de material congelado.

Al mismo tiempo, se observó un fenómeno muy similar en los alrededores del Club Náutico de Bariloche (**Tabla 1.2**), pero sin causar dificultades particulares para la actividad o en los intentos de evitar el ingreso de nuevos *pumice rafts* a la dársena (**sección 3.5.5**).

3.3.5. Problemáticas de sedimentación & removilización de ceniza volcánica

El asentamiento de material piroclástico en la zona o *dominio* marítimo del puerto puede tener un impacto significativo en la operatividad del puerto. La acumulación de ceniza la costa puede

reducir las áreas maniobrables y comprometer rampas o bajadas de lanchas. Además, la depositación de ceniza en el lecho de bocanas, canales, dársenas y espacios de fondeo o radas puede reducir las profundidades de calado apropiado. A su vez, este material depositado también representa un riesgo para las embarcaciones por problemáticas asociadas a la removilización del depósito a causa del mismo tráfico de las embarcaciones.

Las problemáticas de sedimentación en el puerto pueden estar asociada a múltiples fuentes de aporte de material piroclástico. Esto incluye: (1) la caída primaria de ceniza volcánica directamente sobre el puerto; (2) ingresos de *pumice rafts* (**sección 3.3.3**); (3) el transporte de carga suspendida o de fondo; (4) migraciones del depósito de playa por corrientes longitudinales; (5) lahares, lahares secundarios, aportes fluviales (**sección 3.4.1**); y la progradación de deltas (**sección 3.4.1**), entre otros. Naturalmente, estos procesos pueden ocurrir de manera simultánea, lo que a menudo dificulta distinguir entre ellos, y pueden prolongar en el tiempo las problemáticas de sedimentación y removilización, incluso años después de la erupción volcánica.

Estas problemáticas pueden requerir grandes y costosas obras de remediación e incluso otro tipo de adecuaciones ingenieriles para evitar reingresos de ceniza en el puerto (incluyendo dragado, obras hidrológicas, adecuación de sitios de acopio del material refulado, etc.). En casos extremos, la acumulación masiva de material piroclástico puede llegar a sepultar o destruir un puerto, forzando su abandono.

Un ejemplo notable de esto ha sido la pérdida de la capacidad portuaria de la localidad de Chaitén (Chile) tras la erupción del volcán homónimo en mayo de 2008. En los años posteriores, la removilización del material piroclástico depositado en cuencas proximales hacia la bahía de Chaitén (Pierson et al. 2013; Major et al. 2016) significó serios problemas de sedimentación y pérdida de calado. Estos problemas no solo afectaron la antigua rampa, ubicada en el extremo noroeste de la localidad, sino también un nuevo pontón flotante instalado en el año 2011 inmediatamente al lado de la antigua rampa comprometida. Como consecuencia, la operación normal de las embarcaciones en la zona se vio impedida, lo que requirió trabajos intensivos de dragado para mantener las condiciones de calado adecuadas.

En esta parte de Chile (Regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes) el transporte marítimo y fluvio-lacustre son los únicos medios que permiten una conectividad completa para distintas áreas insulares o remotas. En respuesta a esta necesidad, en 2021 se inauguró la nueva Rampa de Trasbordadores de Chaitén, ubicada en el acceso norte de la localidad junto a la *Carretera Austral*. Esta nueva terminal portuaria facilita la operación de las embarcaciones que apoyan la conectividad social, la transferencia de rodados, insumos y eventuales evacuaciones de emergencia de la ciudad (CPC 2021).

Otro caso notable de sitios portuarios abatidos por la sedimentación de material piroclástico lo representa la antigua terminal portuaria que se emplazaba en la desembocadura del Río Ibáñez, en el Lago General Carrera (o Lago Buenos Aires en su parte argentina). La erupción del volcán Hudson de 1991 depositó grandes cantidades de material piroclástico en las cuencas fluviales proximales, donde se midieron caídas de ceniza volcánica de hasta más de dos metros de espesor



Figura 3.11. Vista aérea de Pto. Pañuelo antes (febrero de 2011) y diez años después (noviembre de 2021) de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012. La línea discontinua señala la ubicación del muro de gaviones construido para intentar contener el material piroclástico refulado de la bahía.

(Wilson et al. 2009a). La continua removilización fluvial (**sección 3.4.1**) del material piroclástico hacia el lago junto con las problemáticas recurrentes de sedimentación y pérdida de calado, hicieron necesario reubicar la antigua terminal portuaria. Esta misma terminal resultó ser vital para la evacuación de ganado a bordo de ferris barcazas durante la crisis volcánica de 1991.

Las problemáticas de sedimentación y pérdida de calado fueron un desafío generalizado en toda la región del Nahuel Huapi después de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012, especialmente en la costa sur del Lago Nahuel Huapi y el Lago Traful (**Figura 3.11**). En estos lugares, la situación estuvo particularmente agravada por un periodo de bajo nivel de los lagos de la región.

Todas estas problemáticas persistieron a lo largo del tiempo. Hasta el año 2021, los trabajos de dragado, intensificados desde 2011, continúan retirando material piroclástico del lecho de Pto. Pañuelo y el Club Náutico de Bariloche, proveniente del reacomodo dentro de la bahía o por ingreso de material desde las costas.

Una situación similar se observó en varios puertos de la ciudad de Rabaul (en la Isla de Nueva Bretaña, Papúa Nueva Guinea), tras la erupción sincrónica de los volcanes Vulcan y Tavurvur en 1994 (VEI: 4; Blong & McKee 1995). Las caídas piroclásticas de hasta 800 mm de espesor en la ciudad aceleraron muchos problemas preexistentes de sedimentación en los puertos (Blong 2003c). En *Blanche Street*, por ejemplo, se registró una pérdida de calado de hasta 4 m y muchos otros muelles quedaron completamente inutilizables (SMEC International Pty Ltd 1997). Dado que previó que la removilización fluvial del material piroclástico empeorara la situación en uno de los puertos más importantes del país, se recomendó un análisis oceanográfico de la bahía para evaluar la viabilidad a largo plazo de las instalaciones y las acciones de restauración más adecuadas (SMEC International Pty Ltd 1997).

En el Lago Huechulafquen, las caídas de entre 3 mm y 15 mm de espesor de ceniza fina no causaron problemas de pérdida de calado en ninguno de los puertos de la región (**Figura 1.14**). Sin embargo, la removilización de una capa delgada de ceniza depositada en el lecho de Pto. Canoa (**Tabla 1.2**) resultó ser un fenómeno evidente y perdurable, debido principalmente al mismo tráfico de las embarcaciones (**Figura 3.12**).

En vistas de estas problemáticas tan persistentes, el arrojo de material piroclástico producto de operativos de limpieza debería ser una práctica fuertemente desaconsejable (**sección 3.5.4**). A su vez, la acumulación de ceniza volcánica en las costas expuestas al viento también puede afectar el uso de rampas y playas para la bajada de embarcaciones menores y deportivas. Por ejemplo, la sedimentación y resedimentación de inmensos volúmenes de material piroclástico producido por la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 ha comprometido varias áreas recreativas en las costas del Brazo Machete y Brazo Rincón (**Figura 1.13**) en la región noroeste del Lago Nahuel Huapi (Beigt et al. 2019), propensas a desestabilizaciones del talud y la formación de olas extraordinarias (Beigt et al. 2019; 2023; **sección 3.4.2**).



Figura 3.12. Ejemplo de removilización de los depósitos de ceniza sedimentada en Pto. Canoa, por efecto de las hélices del *Catamarán José Julián*, meses después de la erupción volcánica del Calbuco en 2015. Foto cortesía de Catamarán José Julián.

3.4. Otras fuentes de peligro asociadas

Las erupciones volcánicas explosivas pueden generar enormes volúmenes de material piroclástico, el cual es inyectado en la atmósfera y dispersado a grandes distancias por diversos procesos atmosféricos (**sección 1.5.3**). Al depositarse en un medio receptor, la ceniza volcánica puede: (1) asentarse de manera definitiva en sumideros permanentes, interactuando e incorporándose al entorno; (2) depositarse de manera transitoria en sumideros temporarios con diferentes tiempos de residencia; o (3) removilizarse a causa de distintos agentes (Ayrís & Delmelle 2012). Estos procesos secundarios pueden igualmente afectar la actividad naval en áreas alejadas del volcán y mucho tiempo después de finalizada la erupción volcánica. Estos procesos son poco frecuentes y de largo término, por lo que requieren un tratamiento separado.

3.4.1. Impactos por removilización fluvial de ceniza volcánica

Los materiales piroclásticos no consolidados, depositados en ambientes subaéreos, están sujetos a ser erosionados por agentes fluviales que removilizan y resedimentan grandes volúmenes del material aguas abajo. Estos procesos pueden ocurrir de manera sincrónica a la erupción (sin-eruptivos) o de manera diferida (post-eruptivos), incluso décadas después de finalizada la emisión de ceniza volcánica. La removilización fluvial del material piroclástico puede inducir una variedad de impactos en puertos, embarcaciones y la navegación en vías fluviales y lacustres. A continuación, se

describen y ejemplifican algunos de los procesos más significativos de removilización fluvial de tefra identificados en la Patagonia andina y sus impactos asociados en las redes de transporte naval.

La incorporación repentina de grandes volúmenes de material piroclástico ya sea de caída primaria u otros procesos, puede suscitar una serie de cambios hidro-geomórficos en cuencas fluvio-lacustres, causando inundaciones, la agradación, migración o avulsión de canales (p. ej., Hayes et al. 2002; Segschneider et al. 2002; Major et al. 2016), lahares secundarios (Córdoba et al. 2015), entre otros. Todos estos procesos pueden comprometer vías navegables fluviales o impactar la infraestructura aledaña o ubicada aguas abajo, como puertos, inmuebles, accesos viales y embarcaciones.

Poco después del inicio de la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012, inmensos volúmenes de tefra depositados en cuencas proximales al centro eruptivo fueron removilizados por numerosos cursos de agua debido a las precipitaciones que afectaron la región. Durante el mes de junio del mismo año, las cuencas del noroeste de la región noroeste del Lago Nahuel Huapi (**Figura 1.13**) acumularon alrededor de $70 \times 10^6 \text{ m}^3$ de tefra (Beigt et al. 2019) y la removilización fluvial de parte de este depósito provocó la destrucción total de edificios residenciales y accesos e infraestructura vial cercanos.

Todo el material piroclástico transportado por agentes fluviales puede redepositarse en la desembocadura del curso de agua que lo moviliza. Este aporte fluvial sin- o post-eruptivo hacia las cuencas lacustres puede suscitar problemáticas de sedimentación y pérdida de calado en el ámbito marítimo de puertos ubicados aguas abajo (**sección 3.3.5**). En el Brazo Rincón del Nahuel Huapi, la progradación de los deltas de los ríos Pireco y Totoral, junto con el desplazamiento de unos 200 m de la línea de playa comprometieron la habitual zona de botado y embarcadero, comprometieron la habitual zona de botado y embarcadero. Esto ha dificultado, hasta el día de hoy, el tránsito de remolques y la bajada de embarcaciones, una actividad clave para la región (Beigt et al., 2016; 2019; 2023).

Este tipo de problemática se ha identificado regularmente en las regiones afectadas por las erupciones de los volcanes Hudson de 1991 (en el Lago General Carrera/Buenos Aires), Chaitén de 2008 (en la Bahía de Chaitén) y Cordón Caulle de 2011-2012 (en la región norte y sur del Lago Nahuel Huapi). Naturalmente, la sedimentación de material piroclástico en este tipo de ambientes puede estar asociada a una multiplicidad de procesos y fuentes de aporte, difíciles de distinguir. En el Club Náutico de Bariloche (**Tabla 1.2**) por ejemplo, el continuo aporte de material removilizado por un pequeño arroyo hacia la dársena condujo a la necesidad de realizar intensos trabajos de dragado y, finalmente, realizar las obras necesarias para desviar el curso de agua fuera de la bahía portuaria del club.

El material vesiculado fresco, depositado en cuencas fluviales, puede ser removilizado por agentes fluviales e ingresar en el lago, causando la peculiar regeneración de pequeñas y discretas balsas de pómez flotante, o *pumice rafts*, los cuales pueden afectar a las embarcaciones que los encuentren en su camino (**sección 3.2.6**). Varios testigos oculares han reportado la frecuente formación de delgados hilos de ceniza volcánica flotante en las desembocaduras de ríos y arroyos

del noroeste del Lago Nahuel Huapi, en cuencas fluviales donde se midieron caídas piroclásticas muy superiores a los 170 mm de espesor, con valores máximos de hasta ~500 mm (Alloway et al. 2015). La formación de este tipo particular de *pumice raft* se ha verificado incluso años después de la caída primaria de ceniza volcánica, y suele ser mucho más frecuente durante las temporadas invernales, después de eventos de precipitaciones intensas. En agosto de 2019, casi una década después de la erupción del Cordón Caulle y, particularmente, durante una situación de aislamiento vial de Villa La Angostura (**sección A4**), una pequeña embarcación turística con 10 pasajeros a bordo atravesó una delgada y fina banda de *pumice rafts* formada en la desembocadura del arroyo *Cau Cau* en Brazo Rincón (**Figura 1.13**). Este encuentro bastó para obturar los circuitos internos del sistema de refrigeración del fueraborda (**sección 3.2.6**), obligando a detener la embarcación y realizar un despeje de la obturación en la parte interna del motor.

La ceniza volcánica que ingresa en cuencas lacustres puede también fluir como corrientes de densidad, transportando sedimentos en suspensión desde la desembocadura de los cursos de agua en forma de flujos hipo o hiperpicnales (Beigt et al. 2019). En el Lago Nahuel Huapi, estas corrientes han sido detectadas transportando material piroclástico mediante un colector de sedimentos en suspensión instalado frente al prodelta de los ríos Pireco y Totoral en Brazo Rincón (Beigt et al. 2019). Estas corrientes hipopícnalas podrían explicar la formación de los parches de ceniza volcánica suspendidos en el agua a escasa profundidad, identificados por varios navegantes en los años subsiguientes a la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012.

En abril de 2012, un fueraborda con ocho pasajeros a bordo fundió su motor en plena navegación debido a la inadvertida obturación del circuito de refrigeración con fragmentos pumíceos (**sección 3.2.6**). Según se reportó, esto ocurrió inmediatamente después de atravesar una capa de ceniza volcánica suspendida varias decenas de centímetros por debajo de la superficie del lago. Como resultado, la embarcación quedó inoperable y a la deriva del viento, próxima a una playa rocosa. Los tripulantes a bordo debieron desplegar un ancla de capa para evitar la colisión de la embarcación contra las rocas y solicitar auxilio. Finalmente, la embarcación fue remolcada por Prefectura Naval hasta la Bahía de San Patricio, en la Península de Quetrichué (**Figura 1.13**), donde los pasajeros fueron transferidos a un guardacostas y movilizados hacia Villa La Angostura. Este incidente ocurrió a pesar de las medidas de precaución adoptadas, como la colocación de filtros adicionales de mallas tejidas en las tomas de agua del circuito de mar y la orientación del testigo hacia arriba para permitir un chequeo visual del caudal de agua evacuado del circuito de mar, lo que resultó ser ineficaz. Posteriormente se pudo observar que los rotores de goma del circuito quedaron arruinados por el daño abrasivo de la ceniza, y el motor marítimo de la embarcación tuvo que ser reemplazado por completo.

La removilización fluvial puede ocurrir también a través de cursos de agua efluentes que evacúan material piroclástico desde sus embocaduras, en lagos afectados por caídas de ceniza volcánica, comprometiendo vías navegables e infraestructura ubicada aguas abajo.

Durante la erupción del Cordón Caulle, inmensos volúmenes de ceniza volcánica se movilaron por el río Limay, el único efluente del Lago Nahuel Huapi (**Figura 1.13; Figura 3.13**),



Figura 3.13. Transporte del material pumíceo en flotación desde la embocadura en el Lago Nahuel Huapi (a la izquierda) y a través del Río Limay (a la derecha) durante la erupción del Cordón Caulle en 2011-2012.

alcanzando el embalse y represa hidroeléctrica de Alicurá. En este sitio, se midieron caídas de ~20 mm de espesor de ceniza volcánica (Villarosa & Outes 2013; Alloway et al. 2015) formando *in-situ* una significativa capa de ceniza flotante en la superficie del embalse. Esto fue seguido por el continuo arribo de grandes cantidades de material piroclástico transportado por el río hacia el embalse, donde los operarios de la represa midieron espesores de la capa de ceniza flotante superiores a los 45 cm. Las caídas de ceniza volcánica y la deriva de los pumice rafts afectaron por igual algunas de las pequeñas embarcaciones de apoyo que operan en la represa.

3.4.2. Impactos por deslizamientos subácueos & olas tipo tsunami

Las cuencas lacustres recurrentemente afectadas por la depositación de material piroclástico y expuestas a actividad sísmica regional son especialmente propensas a la ocurrencia de deslizamientos subácueos y fenómenos tsunamigénicos asociados (Chapron et al. 2006; Villarosa et al. 2009; Beigt et al. 2016; 2019).

Los deslizamientos en cuerpos lacustres son comunes en ambientes con pendientes elevadas y altas tasas de sedimentación, las cuales favorecen la movilización del sustrato. Estas condiciones son características de los *veriles* de los lagos patagónicos, formas subácueas con aumentos súbitos de la pendiente, originados por la redepositación de sedimentos movilizados por acción de las olas (Beigt et al. 2023) o en frentes deltaicos (Bardet et al. 2003; Kremer et al. 2012; Girardclos et al. 2007). En estos ambientes, la rápida sedimentación y resedimentación de grandes volúmenes de material piroclástico inconsolidado lógicamente aumenta el potencial de ocurrencia de deslizamientos (p. ej., Kataoka 2005; Beigt et al. 2016; Major et al. 2016). Además, la depositación episódica de niveles discretos de tefra en estos ambientes puede favorecer la generación de procesos de remoción en masa subácueos, al generar planos de debilidad que facilitan los procesos de remoción en masa subacuáticos (Harders et al. 2010; Wiemer et al. 2015).

Los deslizamientos subácueos implican también la movilización de grandes masas de agua, generando olas de tipo tsunami en la superficie del lago (p. ej., Brothers et al. 2016; Higman et al. 2018; Avdievitch & Coe 2022).

Estos fenómenos pueden impactar distintos tipos de infraestructura sumergida (Avdievitch & Coe 2022; Masson et al. 2006; Pope et al. 2016) o ubicada en la costa de los lagos (L'Heureux et al. 2014; Higman et al. 2018; Avdievitch & Coe 2022), incluyendo embarcaciones e infraestructura portuaria (Salgado et al. 2023).

Beigt et al. (2023) caracterizan cuatro eventos recientes de inestabilidad de costas causadas por fenómenos gravitacionales en los lagos Espejo, Nahuel Huapi, Huechulafquen y Lácar. Estos eventos tuvieron consecuencias que varían desde el repentino hundimiento de boyas, advertido por guardavidas de un balneario público del Lago Espejo, hasta casos más significativos como el hundimiento íntegro de un muelle durante el sismo de Concepción de 2010 (8.8 Mw; Duputel et al. 2012). El pequeño muelle de madera actualmente reposa a unos 7 m de profundidad en el Lago Huechulafquen, casi a un kilómetro de Pto. Canoa (**Figura 1.14**). En los grandes lagos patagónicos, el origen de estos fenómenos continúa siendo poco conocido, a pesar de que los impactos sobre las personas y la infraestructura parecieran ser cada vez más frecuentes.

Uno de los casos más emblemáticos en la región ha sido la destrucción del antiguo Pto. San Carlos (**Tabla 1.2**) durante el Terremoto de Valdivia de mayo de 1960, el mayor sismo instrumentalmente registrado de la historia (9.5 Mw; Kanamori 1977). Este evento provocó el deslizamiento de los sedimentos del lecho lacustre donde se asentaba el muelle, con la consecuente destrucción del puerto, el hundimiento de numerosas embarcaciones amarradas y la lamentable pérdida de dos vidas humanas (**sección 1.6.3**). Los mecanismos desencadenantes de la ola tipo tsunami que golpeó la costa de la ciudad de San Carlos de Bariloche han sido descritos por Villarosa et al. (2009).

	ÁREA AFECTADA	CARACTERÍSTICAS DEL PELIGO		Estabilidad & navegabilidad	Abrasión en cubierta	Corrosión en cubierta	Deterioro en cubierta	Contaminac. de aceites (en cub)	Sist. con circulac. de aire	Ingresos en interiores	Contaminac. de aceites (en int)	Sistemas de energía	Dispositivos Electrónicos	Sist. Cent. Comp. navi-com	Sist. con toma de agua de mar	Sist. de Propuls. & Transmisión	Turbinas	Cascos	Infraestructura portuaria	Maquinaria portuaria	SIC portuarios	Problemáticas de accesibilidad	Ingresos de PR	Engelamiento de PR	Problemáticas de sed. /remob.	Limpieza en buques	Limpieza en Dominios Terr.
		DEPÓSITO DE CENIZA	CENIZA EN EL AGUA																								
HUD 1991	Embarcadero de Pto. Ibáñez	2 - 5 mm Ceniza Andesítica a Dacítica*1	Formación de PR. Ingresos por intensa y perdurable RF de tefra por el R. Ibáñez al L. Gral. Carrera	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/A	✓	N/I	N/A	N/I	✓	N/A	✓	✓	✓		✓	✓	✓
CHAITÉN 2008	Los Alerces (N)	0.1 - 2 mm Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos				✓	N/I	✓	✓					✓		N/A			N/A	✓	✓	✓			✓	
	Los Alerces (S)	2 - 17 mm Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos	✓	✓	✓	✓	N/I	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	N/A	✓	✓	✓			✓	✓
	Represa Hidroeléctrica Futaleufú	>30 mm*2 Ceniza MF Riolítica	Formación en el lugar y deriva de PR suspendidos por >8 semanas en el Embalse Situación*2	N/I	✓	✓	✓	N/I	N/I	N/I	N/A	N/I	✓		✓		N/A	N/I	N/A	N/A	✓	✓	✓			✓	✓
CORDÓN CAULLE 2011-2012	Pto. Canoa	Trazas	No se observaron PR				✓		✓								N/A			N/A	N/I						
	Pto. San Martín	2 - 4 mm Ceniza F Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos				✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	L. Nahuel Huapi (NW)	> 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy espesos de tamaño lapilli predominantemente, despejados rápidamente por el viento hacia el SE. Ingresos por intensa y perdurable RF de tefra por ríos y arroyos tributarios al L. Nahuel Huapi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	N/A	N/A	✓	✓	N/A		✓	✓	N/A
	Ptos. de VLA	150 - 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Bahía Manzano	150 - 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica		✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Pto. Traful	~50 mm Ceniza M a F Riolítica	Formación en el lugar y deriva de PR, despejados rápidamente por el viento hacia el E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓		✓	N/A	✓	✓	✓	✓	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Pto. Blest & Mlle. Cántaros	Trazas	No se observaron PR														N/A					✓					
	Pto. Pañuelo	45 - 50 mm Ceniza M a G Riolítica	Formación PR muy delgados y MF, seguido por deriva de PR más espesos y gruesos (~30 cm; lapilli)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Club Náutico Bariloche	35 - 40 mm Ceniza M a G Riolítica	Ingresos ocasionales de PR más gruesos (lapilli) con viento del E. Moderado ingreso de tefra por RF	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓
	Pto. San Carlos	35 - 40 mm Ceniza M a G Riolítica	Ingresos ocasionales de PR más gruesos (lapilli) con viento del E. Depósitos de costa >>40 cm	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	N/I	✓	N/A	✓	(?)	✓	✓	✓
	Represa Hidroeléctrica Alicurá	~20 mm Ceniza M a F Riolítica	Formación de PR espesos y M. Seguido por inmensos ingresos de tefra (~45 cm) por RF del R. Limay	✓	✓	✓	✓		✓	N/A	N/A	✓	✓		✓	N/A	N/A	✓	N/A	N/A	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	N/A
CALBUCO 2015	Pto. Canoa	~3 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	No se observaron PR		✓	✓	✓		✓	✓					✓		N/A			N/A	N/I	✓			✓	✓	
	Pto. San Martín	7 - 12 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	Formación de PR muy delgados y F, seguido por la deriva al E de PR también delgados		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Pto. Traful	~5 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	Formación de PR muy delgados, despejados rápidamente por el viento hacia el E		✓		✓		✓	✓					N/A				✓	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Ptos. de VLA	~1 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	No se observaron PR							✓				N/A						✓	✓	N/A				✓	

Tabla 3.1. Síntesis de impactos observados, según la verificación de ocurrencia o ausencia de impacto. *N/A: no aplica; N/I: no investigado. *¹: Naranjo et al. (1993); Scasso et al. (1994); *²: Wilson et al. (2012a). MF: ceniza muy fina; F: ceniza fina; M: ceniza media; G: ceniza gruesa; MG: ceniza muy gruesa (Teruggi 1982). PR: pumice rafts.*

3.5. Prevención, mitigación & remediación de daños

A continuación, se describen algunos de los esfuerzos implementados por los operarios de puertos y embarcaciones para prevenir, mitigar o remediar los impactos de la ceniza volcánica sobre sitios y elementos afectados. En cada caso, se discute también el grado de éxito relativo con el que se han atenuado los efectos negativos de la ceniza volcánica.

3.5.1. Restricción de la navegación & asilo de buques

Evitar la exposición de las embarcaciones y sus tripulantes restringiendo la navegación y amparando las naves bajo cubierta ha sido, con mucho, la medida más efectiva para prevenir cualquier tipo de daño e incidente.

En numerosas ocasiones, las autoridades locales de seguridad en la Patagonia impusieron restricciones preventivas a la navegación en presencia de ceniza volcánica, sin registrar ningún tipo de incidente significativo (p. ej., **sección A2.2; A3.4; A4.1**). En contraste, todos los casos en los que las autoridades locales de seguridad u operarios particulares de embarcaciones se expusieron a la caída de la ceniza volcánica o a encuentros con *pumice rafts* concluyeron en incidentes o situaciones de riesgo extremo para las personas a bordo (**Anexo A**).

Respecto a las embarcaciones, se identificaron numerosas estrategias implementadas para evitar la exposición de estas a la ceniza volcánica. La puesta a seco y el asilo bajo techo de los buques resultaron ser estrategias muy laboriosas, pero extremadamente eficaces para evitar daños físicos en los barcos. Otros métodos exitosos para evitar el efecto de la carga estática por acumulación de ceniza, daños físicos en las superficies y equipamiento de cubierta o el ingreso de ceniza en espacios confinados (**sección 3.2.1 a 3.2.4**) incluyeron: (1) la protección de la cubierta con cobertores de lona náutica; (2) el sellado y aislamiento de las aberturas de las cabinas (con por ejemplo cinta aisladora); (3) el resguardo de los sistemas electrónicos sensibles para la navegación y la comunicación; y (4) cubrir motores marítimos con protectores plásticos o de lona, entre otros.

3.5.2. Prevención de daños en sistemas con toma de agua de mar

Siendo uno de los impactos más frecuentemente reportados para las embarcaciones, las medidas de prevención de daños en los sistemas con toma de *agua de mar* han sido de lo más diversas.

Para el caso de los sistemas de refrigeración abiertos (**sección 3.2.6**) pueden aplicarse diferentes tipos de filtrado adicional, tanto externos (p. ej., mallas de red en las tomas de agua de mar de grandes y pequeñas embarcaciones, para aumentar la capacidad de filtración de las rejillas) como internos (p. ej., filtros extra de *tipo pileta* en los circuitos internos de embarcaciones mayores). Estas medidas probaron ser muy eficaces para prevenir la entrada de ceniza en el sistema, aunque no infalibles.

En algunos casos específicos, se probó navegar embarcaciones mayores a velocidades reducidas para disminuir el caudal de *agua de mar* que atraviesa estos sistemas y así permitir el correcto funcionamiento y constante mantenimiento de los filtros, tanto regulares como

adicionales. Es importante considerar que el mantenimiento de los filtros internos y externos es una operación laboriosa y delicada, que requiere herramientas y recursos adecuados a bordo. También debe considerarse que este tipo de impacto puede perdurar en el tiempo, a causa de la removilización de los depósitos de ceniza volcánica (**sección 3.3.5; sección 3.4.1**), lo que prolonga la necesidad de medidas preventivas (p- ej., **sección A5.4**). Una característica de resiliencia interesante, identificada en embarcaciones mayores, es la posibilidad de puentear circuitos de refrigeración paralelos, lo que permite realizar tareas de mantenimiento sin detener el sistema de refrigeración.



Figura 3.14. Remoción de la ceniza acumulada en las cubiertas de los catamaranes de Pto. Pañuelo, con una combinación de métodos secos y húmedos.

En embarcaciones menores y deportivas, se probó apuntalar el testigo de agua de los motores fueraborda hacia arriba, permitiendo un monitoreo visual del caudal de agua que circula a través de estos sistemas de refrigeración. Esta estrategia, aunque rudimentaria, ha demostrado ser muy eficaz y es ampliamente utilizada por los navegantes.

Algunos operarios sugieren que los diseños de motores fueraborda con *patas* particularmente elongadas representarían un factor de resiliencia, permitiendo la toma de *agua de mar* a mayor profundidad, eludiendo las masas flotantes de *pumice rafts* (**sección A.3.3.1**).

En el caso de los sistemas de propulsión a turbina (**sección 3.2.8**), resulta importante destacar que, debido a los grandes caudales de agua requeridos, no es posible acoplar instancias adicionales de filtrado en los sistemas. Por lo tanto, la navegación en aguas contaminadas con ceniza volcánica debe ser terminantemente evitada.

3.5.3. Despeje de ceniza del buque

Tanto en los buques como en las instalaciones portuarias, es esencial remover completamente cualquier acumulación de ceniza volcánica antes de reanudar las operaciones. Pero en el caso particular de los buques, la limpieza inmediata de cualquier acumulación de ceniza ha demostrado ser crucial para prevenir impactos de mayor severidad en barcos, como los efectos de la carga estática vertical (**sección 3.2.1**), daños físicos en la cubierta (**sección 3.2.2**) y los ingresos de ceniza volcánica en los espacios confinados de la embarcación (**sección 3.2.3**).

Los métodos de remoción de ceniza más efectivos pueden variar considerablemente, dependiendo de: (1) la cantidad de ceniza acumulada; (2) las características fisicoquímicas del depósito (p. ej., en algunos casos, los depósitos de ceniza húmedos pueden formar masas compactas

y consolidadas, difíciles de remover); (3) el tipo de elemento o sistema contaminado; y (4) la disponibilidad de recursos para la limpieza.

El nivel de complejidad de tales esfuerzos de limpieza también ha sido muy amplio, desde dejar que el viento y la lluvia despejara la ceniza acumulada en cubierta, en casos de acumulaciones pequeñas; hasta operaciones coordinadas que combinaron métodos secos (palas, escobas, escobillones, sopladores) y húmedos (agua de sistemas de lucha contra incendios, de lastre, baldeo, sentina, baldazos de agua) (**Figura 3.14**).

En los casos de ingreso de ceniza volcánica fina en espacios confinados (**sección 3.2.3**), la remoción del material ha requerido de métodos mucho más complejos y delicados para evitar daños en equipamientos electrónicos más sensibles. Estos métodos pueden incluir el uso de paños secos y húmedos, aspiradoras y compresores de aire a baja presión.

3.5.4. Despeje de ceniza del puerto

En zonas terrestres, o *land-side domains*

Al igual que para los buques, remover la ceniza volcánica acumulada en la zona terrestre del puerto (*land-side domain*) es esencial para reanudar con las operaciones. Sin embargo, y a pesar de que la remoción inmediata de la ceniza pueda evitar algunos desgastes físicos en las superficies expuestas, el apremio por iniciar la limpieza del puerto puede conducir a la necesidad de tener que reiterar estos esfuerzos, sea por la persistencia de la caída primaria o la removilización eólica de la ceniza volcánica, sin que se logren grandes diferencias en los resultados. Por esta razón, se recomienda esperar a que finalice la emisión de ceniza volcánica para iniciar los operativos de limpieza en el ámbito del puerto.

Los métodos más efectivos de remoción de ceniza pueden ser variados y al igual que para la limpieza de las embarcaciones, dependen de varios factores. En este caso, la disponibilidad de recursos suficientes para realizar esta labor ha sido determinante en Patagonia.

En numerosas ocasiones, el inicio de la limpieza de los puertos ha sido considerablemente demorado a causa de interrupciones prolongadas en las accesibilidades viales a los puertos, y la imposibilidad de movilizar los recursos necesarios para la limpieza. Tal fue el caso en numerosos sitios del Parque Nacional Los Alerces, durante la erupción del Chaitén de 2008 (**sección A2.2**); en Villa y Puerto Traful, durante la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012 (**sección A3.5.3**); y en Puerto Canoa, durante la erupción del Calbuco de 2015 (**sección A4.2**), entre los casos más significativos.

El nivel de complejidad de la limpieza del puerto también puede variar ampliamente, desde dejar que el viento y la lluvia despejara la ceniza acumulada, principalmente en sitios remotos con difícil acceso; hasta casos en los que se requirió el empleo de maquinaria pesada para remover el material piroclástico, como ocurrió en numerosos del sur del Lago Nahuel Huapi, durante la erupción del Cordón Caulle de 2011-2012.

En zonas marítimas, o *sea-side domains*

La remoción de ceniza volcánica sedimentada en zonas marítimas del puerto (*sea-side domains*) representa una labor mucho más compleja, particularmente cuando el asentamiento del material piroclástico significa una pérdida de la profundidad de calado adecuada (**sección 3.3.5**). Este tipo de problemática puede requerir la implementación de importantes obras de remediación, como el dragado del material, obras hidrológicas y la adecuación de sitios para acopiar el material refulado (**Figura 3.15**).



Figura 3.15. Fotografía del material, primordialmente piroclástico, refulado por el dragado de la bahía de Pto. Pañuelo, varios años después de la erupción volcánica de 2011-2012 (mayo de 2019).

En casos de acumulaciones extremas, la imposibilidad de remover semejantes volúmenes de material piroclástico ha conducido al abandono permanente del sitio. Algunos de los ejemplos más notables se describen en la **sección 3.3.5**, e incluyen casos como los del Lago General Carrera/Buenos Aires, tras la erupción del Hudson de 1991 y Pto. Chaitén, tras la erupción de 2008.

Por todo esto, el arrojar a los lagos el material piroclástico colectado durante los operativos de limpieza de puertos o ámbitos urbanos debería ser una práctica fuertemente desalentada (**sección 3.3.5**). Por ejemplo, durante los primeros días de limpieza de la localidad de Villa Tráful, demorada por problemáticas de accesibilidad, gran parte del material piroclástico removido fue arrojado al lago, en sitios cercanos al puerto. Estas acciones fueron rápidamente interrumpidas al verificarse la removilización del material arrojado al agua. Situaciones similares se observaron en Pto. San Martín, durante las erupciones del Cordón Caulle de 2011-2012 y Calbuco en 2015; y al sur del Lago Nahuel Huapi en 2011-2012.

3.5.5. Prevención de ingresos de *pumice rafts* en bahías

El ingreso de material piroclástico flotante hacia las zonas de atraque, permanencia y fondeo del puerto, o cualquier otro sitio crítico (**sección 3.3.3**), puede ser parcialmente detenido mediante barreras de contención, tipo bermas de contención o desviaciones, similares a las empleadas para manejar derrames de hidrocarburos. Esta estrategia se probó durante la erupción y caída piroclástica del Cordón Caulle de 2011-2012 en Pto. Pañuelo (**Tabla 1.2**), el Club Náutico Bariloche (**Tabla 1.2**) y en la Represa Hidroeléctrica de Alicurá (**Figura 1.13**), con resultados inconsistentes según el caso. En Pto. Pañuelo, los operarios del puerto instalaron una de estas barreras de contención en la entrada a la zona de atraque y permanencia, con el objetivo de detener el ingreso del material pumíceo arrastrado en flotación por el viento desde el noroeste. Sin embargo, las barreras fueron retiradas casi de inmediato al comprobar que no eran efectivas para evitar el ingreso de *pumice rafts* de más de 35 cm de espesor en promedio (**sección 3.3.3**).



Figura 3.16. Ejemplos de las barreras de contención instaladas para detener y desviar el material pumíceo en flotación arrastrado por el Río Limay hacia la represa hidroeléctrica de Alicurá, durante los primeros días de la erupción (abajo) y las semanas subsiguientes (arriba).

En la Represa Hidroeléctrica de Alicurá se implementó una estrategia similar, instalando un total de cuatro barreras de contención, con una longitud total de 600 m, para desviar los *pumice rafts* arrastrados por el Río Limay hacia el aliviadero de la represa, lejos de la toma de agua de las turbinas (**Figura 3.16**). Paralelamente, los operarios de la represa redujeron la tasa de generación y caudal de agua al mínimo técnico, para mejorar la eficacia de las barreras, que permanecieron instaladas por aproximadamente cuatro meses. No obstante, dos meses después de iniciada la erupción, los filtros de agua del sistema de refrigeración quedaron completamente colmatados con ceniza volcánica fina, requiriendo mantenimiento. Años después, una inspección subacuática del lecho de la represa reveló hasta 12 m de espesor de material sedimentado, el cual debió ser dragado aguas abajo en 2015. Estos esfuerzos por encauzar los *pumice rafts* fueron obstaculizados por el ocasional engelamiento del material, formando masas compactas y difíciles de manipular (**sección 3.3.4**). Algunas embarcaciones de apoyo tipo RIB (**Tabla 1.1**) también fueron afectadas por la presencia por la caída de ceniza volcánica y *pumice rafts*, lo que requirió una mayor limpieza de los filtros de los motores.

En contraste, la instalación transitoria de una barrera de flotadores mucho más pequeña en la bocana de la marina del Club Náutico Bariloche demostró ser completamente efectiva para detener el ingreso de pómez a la dársena del club. En este sitio, un rompeolas de 200 m de longitud orientado hacia el este obstaculizó el ingreso de *pumice rafts* arrastrados por el viento desde el noroeste, por lo que la barrera sólo se montaba en las pocas ocasiones en las que el viento soplaba desde el este. Esta línea de flotadores y barrera de lona náutica se instaló por primera vez aproximadamente un mes después de iniciada la erupción del Cordón Caulle y su uso se extendió esporádicamente hasta el año siguiente.

3.6. Evaluación & modelado de impactos

3.6.1. Grados de Severidad de Impacto (GSI)

En la **Tabla 3.1** se resume la ocurrencia, o ausencia, de impactos observados en cada sitio afectado por las caídas piroclásticas, considerando los distintos sistemas y elemento del buque dañados, o *dominios* portuarios comprometidos.

Sin embargo, la información empírica que se presenta en esta y otras investigaciones (p. ej., Wilson et al. 2012a; 2014a; Jenkins et al. 2014) sugiere que en realidad los impactos de la ceniza volcánica sobre los servicios de infraestructura crítica, incluidos los sistemas de transporte, suelen manifestarse en un continuo con distintos *grados de severidad de impacto* (GSI). Estos GSI pueden variar desde casos virtualmente insignificantes, como contratiempos leves o *nuisance-impacts*; (Jenkins et al. 2014a) hasta pérdidas terminantes como la destrucción total del activo.

Alexander (1989), por ejemplo, en su evaluación de impactos por procesos de remoción en masa en entornos urbanos, reconoce tres grandes divisiones para categorizar GSI, las cuales son comúnmente aplicadas en evaluaciones de peligros naturales. Estas tres categorías se definen como: (1) daños suficientemente leves para permitir hacer uso de la estructura; (2) daños suficientemente severos para comprometer el uso de la estructura hasta ser reparada; y (3) daños que no pueden ser (económicamente) reparados.

Por su parte, Wilson et al. (2014a) utilizan cuatro “niveles” de GSI para clasificar y organizar los efectos de distintos peligros volcánicos sobre siete sistemas de infraestructura crítica. Estos niveles se definen como *Nivel 0*: sin daños; *Nivel 1*: requerimiento de limpieza; *Nivel 2*: requerimiento de reparación; y *Nivel 3*: requerimiento de reemplazo, o reparación costosa.

De manera similar, Jenkins et al. (2015) definen seis “estados” para distinguir GSI por caída de ceniza volcánica sobre cuatro tipos de infraestructura crítica (incluyendo aeropuertos, energía, ferrovías y caminos viales), edificaciones edilicias y agricultura. Estos estados se definen como *D0*: sin daño; *D1*: requerimiento de reparaciones básicas o menores; *D2*: requerimiento de reparaciones moderadas; *D3-D4*: requerimiento de reparaciones mayores o especializadas; y *D5*: reparación económicamente inviable.

Para este trabajo, se definen cuatro “niveles” ordinales (Lehmann et al. 1998) para dividir los impactos observados con un grado de severidad creciente, equivalentes a los sugeridos por Wilson et al. (2014a) para otros sistemas de infraestructura crítica. Estos niveles se definen como:

- *Nivel 0*: Sin daño físico; sin interrupción.
- *Nivel 1*: Requerimiento de limpieza.
- *Nivel 2*: Requerimiento de reparación.
- *Nivel 3*: Destrucción total (reemplazo o reparación económicamente inviable); pérdida terminante de funcionamiento y abandono.

Esta categorización de impactos permite ilustrar de forma más adecuada la naturaleza gradacional de la severidad de los impactos observados en Patagonia, tal como se representa gráficamente en la **Tabla 3.2**. Incluso existen algunos ejemplos (Foster 1976; Klyachko 1996; Davidson 1997) donde los GSI son continuos, sin división numérica racional alguna.

3.6.2. Medidas de Intensidad del Peligro (MIP)

Los peligros naturales, incluyendo los de origen volcánico, poseen una serie de características propias del fenómeno que tienen el potencial de causar daño o interrupción (Jenkins et al. 2014; Wilson et al. 2014a). Por ejemplo, la principal característica dañina de los sismos es el movimiento o temblor del terreno, comúnmente dimensionada por la aceleración máxima del suelo, mientras que las corrientes de densidad piroclástica pueden causar daños debido a su carga lateral o presión dinámica, y sus elevadas temperaturas (McCalpin 1996; Blong 2003b; Spence et al. 2004; Baxter et al. 2005). Estas propiedades se definen colectivamente como Medidas de Intensidad del Peligro (MIP) o *Hazard Intensity Metrics* (HIM) (Schmidt et al. 2011; Smith 2013; Wilson et al. 2014a).

Por lo general, cada peligro natural, incluyendo la mayoría de los peligros volcánicos, presenta unas pocas propiedades capaces de generar impactos. Por el contrario, la ceniza volcánica se caracteriza por presentar numerosas características físicas y químicas con el potencial de causar daño y interrupción (**sección 1.5.3**), como lo son la granulometría de sus componentes, el potencial abrasivo de los vitroclastos, su densidad, friabilidad y la concentración y composición química de elementos lixiviables, entre otros (Johnston et al. 2000; Cronin et al. 2003; Witham et al. 2005; Stewart et al. 2006; Wilson et al. 2010b; Wardman et al. 2012a, 2012b; etc.). Entre estos, la carga estática vertical o espesor del depósito de caída de ceniza volcánica han sido los parámetros más apropiados y comúnmente utilizados para evaluar de manera teórica o empírica la intensidad del peligro de caída piroclástica (Blong 1984; Neild et al. 1998; Wilson et al. 2012a; Jenkins et al. 2014; Wilson et al. 2014a).

La **Tabla 3.3a** permite distinguir, al igual que en otros sistemas de infraestructura crítica (Wilson et al. 2014a), la fuerte relación directa que existe entre la cantidad de ceniza volcánica que afecta un sitio, medida como el espesor del depósito de caída piroclástica en milímetros (MIP), y la severidad del impacto resultante (GSI) en distintos elementos o dominios de los buques y los puertos.

Por otro lado, establecer una MIP adecuada para los *pumice rafts*, o cualquier otra amenaza asociada a la presencia de ceniza volcánica en el agua, resulta mucho más complejo y, sorprendentemente, no ha sido aún abordado en la investigación de los impactos por peligros volcánicos.

Con el propósito de resolver este desafío, y fundamentándose en las premisas básicas establecidas para las caídas de ceniza volcánica (Blong 1984; Neild et al. 1998; Wilson et al. 2012a; Jenkins et al. 2014; Wilson et al. 2014a), se elaboró una categorización preliminar y cualitativa, basada en las cantidades o abundancia relativa de ceniza volcánica en el agua para medir la

intensidad de tales peligros. De esta forma, se definieron tres categorías discretas de MIP que incluyen: (1) la ausencia de ceniza volcánica en el agua; (2) la presencia de escasos fragmentos de ceniza volcánica en el agua; y (3) la carga de grandes volúmenes de ceniza en el agua.

Estas aproximaciones no consideran ningún tipo de diferenciación según los procesos que dan origen a la carga de la ceniza volcánica en el agua, debido a las dificultades para discriminar entre un proceso y otro, y a las similitudes observadas entre los impactos resultantes.

La **Tabla 3.3b** permite entonces visualizar, de manera similar a las caídas piroclásticas (**Tabla 3.3a**) la relación directa que existe entre la cantidad relativa de ceniza volcánica que afecta un sitio (MIP) y la severidad de los impactos resultantes (GSI) en distintos elementos o dominios de los buques y los puertos.

3.6.3. Estados de Daño & Disrupción (EDD) y Escalas de Impactos (EI)

El análisis de los impactos de ceniza volcánica en el transporte naval, presentado de manera ordenada según distintas MIP en las **Tablas 3.3a** y **3.3b** (según el espesor del depósito de caída y abundancia relativa de ceniza volcánica en el agua, respectivamente) no solamente sugiere una relación directa entre MIP y GSI. Este análisis permite también vislumbrar la existencia de ciertos límites o umbrales en las intensidades de los peligros que acotan y definen los distintos “niveles” que se determinaron anteriormente (**sección 3.6.1**) para diferenciar distintos GSI (Niveles 0, 1, 2 y 3).

Por ejemplo, a partir de la **Tabla 3.3a** puede determinarse que apenas ~0.1 mm de espesor de caída de ceniza ha sido suficiente para provocar daños menores y problemas operativos en la cubierta de los buques, y suscitar la necesidad de limpieza. Por otro lado, también puede observarse que, entre todos los casos de estudio investigados, no se han reportado desestabilizaciones en las embarcaciones que resultaran en ingresos de agua o zozobrados por debajo de los 150 mm de espesor de caída de ceniza volcánica.

De esta manera pueden establecerse distintos *estados de daño y disrupción* (EDD), categorías definidas por un umbral de MIP y determinado nivel de GSI asociado para cada elemento, sistema o dominio afectado por la ceniza volcánica.

A su vez, el ordenamiento de estos EDD según MIP y GSI crecientes permite la construcción de una nueva Escala de Impactos (EI) que modela los efectos de la ceniza volcánica en los buques (**Tabla 3.4a**) y en los puertos (**Tabla 3.4b**).

Las Escalas de Impactos (EI) son un tipo particular de escala de vulnerabilidad, construcciones que sistematizan las consecuencias resultantes de un determinado evento físico en cierto elemento expuesto (Blong 2003a). Dicho de otra manera, las EI permiten describir la relación que existe entre una MIP y el correspondiente GSI sobre un elemento, sistema o actividad de la sociedad (Rossetto et al. 2010).

	ÁREA AFECTADA	CARACTERÍSTICAS DEL PELIGO		Estabilidad & navegabilidad	Abrasión en cubierta	Corrosión en cubierta	Deterioro en cubierta	Contaminac. de aceites (en cub)	Sist. con circulac. de aire	Ingresos en interiores	Contaminac. de aceites (en int)	Sistemas de energía	Dispositivos Electrónicos	Sist. Cent. Comp. navi-com	Sist. con toma de agua de mar	Sist. de Propuls. & Transmisión	Turbinas	Cascos	Infraestructura portuaria	Maquinaria portuaria	SIC portuarios	Problemáticas de accesibilidad	Ingresos de PR	Engelamiento de PR	Problemáticas de sed. /remob.	Limpieza en buques	Limpieza en Dominios Terr.
		DEPÓSITO DE CENIZA	CENIZA EN EL AGUA																								
HUD 1991	Embarcadero de Pto. Ibáñez	2 - 5 mm Ceniza Andesítica a Dacítica**	Formación de PR. Ingresos por intensa y perdurable RF de tefra por el R. Ibáñez al L. Gral. Carrera	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/A	✓	N/I	N/A	N/I	✓	N/A	✓	✓	✓		✓	✓	✓
CHAITÉN 2008	Los Alerces (N)	0.1 - 2 mm Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos				✓	N/I	✓	✓					✓		N/A			N/A	✓	✓	✓			✓	
	Los Alerces (S)	2 - 17 mm Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos	✓	✓	✓	✓	N/I	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	N/A	✓	✓	✓			✓	✓
	Represa Hidroeléctrica Futaleufú	>30 mm** Ceniza MF Riolítica	Formación en el lugar y deriva de PR suspendidos por >8 semanas en el Embalse Situación***	N/I	✓	✓	✓	N/I	N/I	N/I	N/A	N/I	✓		✓		N/A	N/I	N/A	N/A	✓	✓	✓			✓	✓
CORDÓN CAULLE 2011-2012	Pto. Canoa	Trazas*	No se observaron PR				✓		✓								N/A			N/A	N/I	✓					
	Pto. San Martín	2 - 4 mm Ceniza F Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos				✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	L. Nahuel Huapi (NW)	> 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy espesos de tamaño lapilli predominantemente, despejados rápidamente por el viento hacia el SE. Ingresos por intensa y perdurable RF de tefra por ríos y arroyos tributarios al L. Nahuel Huapi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	N/A	N/A	✓	✓	N/A		✓	✓	N/A
	Ptos. de VLA	150 - 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Bahía Manzano	150 - 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Pto. Traful	~50 mm Ceniza M a F Riolítica	Formación en el lugar y deriva de PR, despejados rápidamente por el viento hacia el E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓		✓	N/A	✓	✓	✓	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Pto. Blest & Mlle. Cántaros	Trazas*	No se observaron PR														N/A					✓					
	Pto. Pañuelo	45 - 50 mm Ceniza M a G Riolítica	Formación PR muy delgados y MF, seguido por deriva de PR más espesos y gruesos (~30 cm; lapilli)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Club Náutico Bariloche	35 - 40 mm Ceniza M a G Riolítica	Ingresos ocasionales de PR más gruesos (lapilli) con viento del E. Moderado ingreso de tefra por RF	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓
	Pto. San Carlos	35 - 40 mm Ceniza M a G Riolítica	Ingresos ocasionales de PR más gruesos (lapilli) con viento del E. Depósitos de costa >> 40 cm	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	N/I	✓	N/A	✓	(?)	✓	✓	✓
	Represa Hidroeléctrica Alicurá	~20 mm Ceniza M a F Riolítica	Formación de PR espesos y M. Seguido por inmensos ingresos de tefra (~45 cm) por RF del R. Limay	✓	✓	✓	✓		✓	N/A	N/A	✓	✓		✓	N/A	N/A	✓	N/A	N/A	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	N/A
CALBUCO 2015	Pto. Canoa	~3 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	No se observaron PR		✓	✓	✓		✓	✓					✓		N/A			N/A	N/I	✓			✓	✓	
	Pto. San Martín	7 - 12 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	Formación de PR muy delgados y F, seguido por la deriva al E de PR también delgados		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Pto. Traful	~5 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	Formación de PR muy delgados, despejados rápidamente por el viento hacia el E		✓		✓		✓	✓					N/A				✓	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Ptos. de VLA	~1 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	No se observaron PR							✓				N/A						✓	✓	N/A				✓	

Tabla 3.2. Síntesis de impactos observados, según distintos Grados de Severidad de Impacto (GSI), donde verde: Nivel 0 (sin daño físico; sin disrupción); amarillo: Nivel 1 (requerimiento de limpieza); naranja: Nivel 2 (requerimiento de reparación); y rojo: Nivel 3 (destrucción total). *N/A: no aplica; N/I: no investigado. *¹: Naranjo et al. (1993); Scasso et al. (1994); *²: Wilson et al. (2012a). MF: ceniza muy fina; F: ceniza fina; M: ceniza media; G: ceniza gruesa; MG: ceniza muy gruesa (Teruggi 1982). PR: pumice rafts.*

	ÁREA AFECTADA	CARACTERÍSTICAS DEL PELIGO		Estabilidad & navegabilidad	Abrasión en cubierta	Corrosión en cubierta	Deterioro en cubierta	Contaminac. de aceites (en cub)	Sist. con circulac. de aire	Ingresos en interiores	Contaminac. de aceites (en int)	Sistemas de energía	Dispositivos Electrónicos	Sist. Cent. Comp. navi-com	Sist. con toma de agua de mar	Sist. de Propuls. & Transmisión	Turbinas	Cascos	Infraestructura portuaria	Maquinaria portuaria	SIC portuarios	Problemáticas de accesibilidad	Ingresos de PR	Engelamiento de PR	Problemáticas de sed. /remob.	Limpieza en buques	Limpieza en Dominios Terr.
		DEPÓSITO DE CENIZA	CENIZA EN EL AGUA																								
	Pto. Blest & Mlle. Cántaros	Trazas*	No se observaron PR														N/A					✓					
	Pto. Canoa	Trazas*	No se observaron PR				✓		✓								N/A			N/A	N/I						
	Los Alerces (N)	0.1 - 2 mm Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos				✓	N/I	✓	✓					✓		N/A			N/A	✓	✓	✓			✓	
	Ptos. de VLA	~1 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	No se observaron PR							✓				N/A					✓	✓	N/A				✓		
	Pto. Canoa	~3 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	No se observaron PR		✓	✓	✓		✓	✓					✓		N/A			N/A	N/I	✓			✓	✓	
	Pto. San Martín	2 - 4 mm Ceniza F Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos				✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Embarcadero de Pto. Ibáñez	2 - 5 mm Ceniza Andesítica a Dacita**	Formación de PR. Ingresos por intensa y perdurable RF de tefra por el R. Ibáñez al L. Gral. Carrera	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/A	✓	N/I	N/A	N/I	✓	N/A	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Pto. Traful	~5 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	Formación de PR muy delgados, despejados rápidamente por el viento hacia el E		✓		✓		✓	✓					N/A				✓	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Pto. San Martín	7 - 12 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	Formación de PR muy delgados y F, seguido por la deriva al E de PR también delgados		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Los Alerces (S)	2 - 17 mm Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos	✓	✓	✓	✓	N/I	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	N/A	✓	✓	✓			✓	✓
	Represa Hidroeléctrica Alicurá	~20 mm Ceniza M a F Riolítica	Formación de PR espesos y M. Seguido por inmensos ingresos de tefra (~45 cm) por RF del R. Limay	✓	✓	✓	✓		✓	N/A	N/A	✓	✓		✓	N/A	N/A	✓	N/A	N/A	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	N/A
	Represa Hidroeléctrica Futaleufú	>30 mm** Ceniza MF Riolítica	Formación en el lugar y deriva de PR suspendidos por >8 semanas en el Embalse Situación***	N/I	✓	✓	✓	N/I	N/I	N/I	N/A	N/I	✓		✓		N/A	N/I	N/A	N/A	✓	✓	✓		✓	✓	N/A
	Club Náutico Bariloche	35 - 40 mm Ceniza M a G Riolítica	Ingresos ocasionales de PR más gruesos (lapilli) con viento del E. Moderado ingreso de tefra por RF	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓
	Pto. San Carlos	35 - 40 mm Ceniza M a G Riolítica	Ingresos ocasionales de PR más gruesos (lapilli) con viento del E. Depósitos de costa >> 40 cm	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	N/I	✓	N/A	✓	(?)	✓	✓	✓
	Pto. Pañuelo	45 - 50 mm Ceniza M a G Riolítica	Formación PR muy delgados y MF, seguido por deriva de PR más espesos y gruesos (~30 cm; lapilli)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Pto. Traful	~50 mm Ceniza M a F Riolítica	Formación en el lugar y deriva de PR, despejados rápidamente por el viento hacia el E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓		✓	N/A	✓	✓	✓	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Bahía Manzano	150 - 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy espesos de tamaño lapilli predominantemente, despejados rápidamente por el viento hacia el SE. Ingresos por intensa y perdurable RF de tefra por ríos y arroyos tributarios al L. Nahuel Huapi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Ptos. de VLA	150 - 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	L. Nahuel Huapi (NW)	> 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	N/A	N/A	✓	✓	N/A		✓	✓	N/A

Tabla 3.3a. Síntesis de impactos observados, según distintos Grados de Severidad de Impacto (GSI), ordenados de forma creciente según el espesor de caída de caída de ceniza volcánica. *N/A: no aplica; N/I: no investigado. *¹: Naranjo et al. (1993); Scasso et al. (1994); *²: Wilson et al. (2012a). MF: ceniza muy fina; F: ceniza fina; M: ceniza media; G: ceniza gruesa; MG: ceniza muy gruesa (Teruggi 1982). PR: pumice rafts.*

	ÁREA AFECTADA	CARACTERÍSTICAS DEL PELIGO		Estabilidad & navegabilidad	Abrasión en cubierta	Corrosión en cubierta	Deterioro en cubierta	Contaminac. de aceites (en cub)	Sist. con circulac. de aire	Ingresos en interiores	Contaminac. de aceites (en int)	Sistemas de energía	Dispositivos Electrónicos	Sist. Cent. Comp. navi-com	Sist. con toma de agua de mar	Sist. de Propuls. & Transmisión	Turbinas	Cascos	Infraestructura portuaria	Maquinaria portuaria	SIC portuarios	Problemáticas de accesibilidad	Ingresos de PR	Engastamiento de PR	Problemáticas de sed./remob.	Limpieza en buques	Limpieza en Dominios Terr.
		DEPÓSITO DE CENIZA	CENIZA EN EL AGUA																								
	Pto. Canoa	Trazas	No se observaron PR				✓		✓								N/A			N/A	N/I						
	Pto. Blest & Mlle. Cántaros	Trazas	No se observaron PR														N/A					✓					
	Ptos. de VLA	~1 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	No se observaron PR							✓				N/A						✓	✓	N/A				✓	
	Pto. Canoa	~3 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	No se observaron PR		✓	✓	✓		✓	✓					✓		N/A			N/A	N/I	✓			✓	✓	
	Pto. Traful	~5 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	Formación de PR muy delgados, despejados rápidamente por el viento hacia el E		✓		✓		✓	✓					N/A				✓	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Los Alerces (N)	0.1 - 2 mm Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos				✓	N/I	✓	✓					✓		N/A			N/A	✓	✓	✓			✓	
	Pto. San Martín	2 - 4 mm Ceniza F Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos				✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Pto. San Martín	7 - 12 mm Ceniza F Dacita-Andesítica	Formación de PR muy delgados y F, seguido por la deriva al E de PR también delgados		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Los Alerces (S)	2 - 17 mm Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy delgados y MF, seguido por la deriva al E de PR más espesos y gruesos	✓	✓	✓	✓	N/I	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	N/A	✓	✓			✓	✓	✓
	Pto. San Carlos	35 - 40 mm Ceniza M a G Riolítica	Ingresos ocasionales de PR más gruesos (lapilli) con viento del E. Depósitos de costa >> 40 cm	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	N/I	✓	N/A	✓	(?)	✓	✓	✓
	Pto. Traful	~50 mm Ceniza M a F Riolítica	Formación en el lugar y deriva de PR, despejados rápidamente por el viento hacia el E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓		✓	N/A	✓	✓	✓	N/I	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Club Náutico Bariloche	35 - 40 mm Ceniza M a G Riolítica	Ingresos ocasionales de PR más gruesos (lapilli) con viento del E. Moderado ingreso de tefra por RF	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓
	Pto. Pañuelo	45 - 50 mm Ceniza M a G Riolítica	Formación PR muy delgados y MF, seguido por deriva de PR más espesos y gruesos (~30 cm; lapilli)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Embarcadero de Pto. Ibáñez	2 - 5 mm Ceniza Andesítica a Dacítica*1	Formación de PR. Ingresos por intensa y perdurable RF de tefra por el R. Ibáñez al L. Gral. Carrera	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/A	✓	N/I	N/A	N/I	✓	N/A	✓	✓			✓	✓	✓
	Represa Hidroeléctrica Alicurá	~20 mm Ceniza M a F Riolítica	Formación de PR espesos y M. Seguido por inmensos ingresos de tefra (~45 cm) por RF del R. Limay	✓	✓	✓	✓		✓	N/A	N/A	✓	✓		✓	N/A	N/A	✓	N/A	N/A	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	N/A
	Represa Hidroeléctrica Futaleufú	>30 mm** Ceniza MF Riolítica	Formación en el lugar y deriva de PR suspendidos por >8 semanas en el Embalse Situación*2	N/I	✓	✓	✓	N/I	N/I	N/I	N/A	N/I	✓		✓		N/A	N/I	N/A	N/A	✓	✓	✓		✓	✓	N/A
	Bahía Manzano	150 - 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica	Formación de PR muy espesos de tamaño lapilli predominantemente, despejados rápidamente por el viento hacia el SE. Ingresos por intensa y perdurable RF de tefra por ríos y arroyos tributarios al L. Nahuel Huapi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	Ptos. de VLA	150 - 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓		✓	✓	✓
	L. Nahuel Huapi (NW)	> 170 mm Lapilli - Ceniza MF Riolítica		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓	N/A	N/A	✓	✓	N/A		✓	✓	N/A

Tabla 3.3b. Síntesis de impactos observados, según distintos Grados de Severidad de Impacto (GSI), ordenados de forma creciente según la abundancia relativa de ceniza volcánica presente en el agua. *N/A: no aplica; N/I: no investigado. *¹: Naranjo et al. (1993); Scasso et al. (1994); *²: Wilson et al. (2012a). MF: ceniza muy fina; F: ceniza fina; M: ceniza media; G: ceniza gruesa; MG: ceniza muy gruesa (Teruggi 1982). PR: pumice rafts.*

ELEMENTOS DEL BUQUE		Nivel 0 Sin daños	Nivel 1 Limpieza requerida	Nivel 2 Reparación requerida	Nivel 3 Destrucción total
Estabilidad & navegabilidad del buque	Límites	<30 mm de ceniza	30 mm – 150 mm de ceniza	>150 mm de ceniza	
	Impacto	Sin daño. Sin interrupción.	Cargas con distribución homogénea: aumento moderado del calado; navegación dificultosa en aguas someras. Cargas con distribución asimétrica; aumento del calado, asiento, y/o escora; pérdida de estabilidad. En buques amarrados o fondeados: rompimiento de cabos, amarras, cornamusas.	Aumento riesgoso del calado (desplazamiento > capacidad de carga); ingreso de agua en espacios estancos; rolido y zozobrado en casos extremos. Efectos intensificados: en embarcaciones descubiertas, sin mantenimiento, con cubiertas amplias y asimétricas y francobordos mínimos; por fallos en sistemas de achique; por precipitaciones, salpicaduras, acumulación de nieve.	
Componentes de cubierta	Límites	<0.1 mm de ceniza	0.1 mm – 5 mm de ceniza	5 mm – 170 mm de ceniza	> 170 mm de ceniza
	Impacto	Sin daño. Sin interrupción.	Posible daño en equipos de amarre, fondeo, manejo de carga y pasajeros, luminarias, etc. (especialmente, en partes móviles). Operaciones de cubierta dificultosas por desarrollo de superficies resbalosas; endurecimiento de cabos; algidez; amenaza para la salud de operarios; obstrucción de ventanas y parabrisas; obturación de tomas y filtros de aire.	Posible abrasión de vidrios y superficies; corrosión de componentes metálicos; podredumbre y crecimiento de hongos y moho en superficies expuestas por humedad retenida; colapso de cabinas de lona; contaminación de aceites lubricantes y combustibles. Operaciones de cubierta restringidas.	Sepultamiento de cubierta: daños extensos en equipamiento; posible daño estructural en superestructuras. Completamente inoperable.
Espacios confinados & interiores	Límites	<1 mm de ceniza	1 mm – 5 mm de ceniza	5 mm – 200 mm de ceniza	> 200 mm de ceniza
	Impacto	Sin daño. Sin interrupción.	Posible ingreso de ceniza en espacios confinados; necesidad de limpieza de superficies expuestas. Operatividad, habitabilidad (amenaza a la salud de operarios y pasajeros) e integridad de carga comprometidas; limpieza dificultosa.	Ingreso de ceniza en espacios confinados; posible daño abrasivo/corrosivo en superficies expuestas; contaminación de aceites lubricantes y combustibles. Operatividad, habitabilidad (amenaza a la salud de operarios y pasajeros) e integridad de carga restringidas; interrupción de sistemas de HVAC.	Ingreso excesivo; daño total. Completamente inoperable.
Sistemas de energía, electrónica & computadoras	Límites	<1 mm de ceniza	1 mm – 50 mm de ceniza	>50 mm de ceniza	
	Impacto	Sin daño. Sin interrupción.	Resiliencia de sistemas eléctricos (unidades de generación, baterías de almacenamiento, redes de distribución y alimentación de dispositivos eléctricos); resiliencia de dispositivos electrónicos (para registro meteorológico, control, navegación y comunicación) Funcionalidad reducida hasta la limpieza.	Posible daño en sistemas eléctricos y dispositivos electrónicos. Fallos en sistemas <i>navi-com</i> centralizados y computarizados (extremadamente vulnerables) a espesores de caída de ceniza mucho más reducidos.	
Sistemas con tomas de agua de mar	Límites	Sin ceniza en el agua	Presencia reducida de ceniza en el agua	Gran volumen de ceniza en el agua	
	Impacto	Sin daño. Sin interrupción.	Posible obturación de tomas, filtros y circuitos internos de <i>agua de mar</i> ; posible daño de bombas y rotores. Desperfectos en motores marítimos por falta de refrigeración hasta la limpieza. Posibles desperfectos en sistemas de lucha contra incendios, lastre o agua doméstica.	Obturación inmediata de tomas, filtros y circuitos internos de <i>agua de mar</i> ; daño de bombas y rotores. Desperfectos en motores marítimos por falta de refrigeración. Posibles desperfectos en sistemas de lucha contra incendios, lastre o agua doméstica. Daños inmediatos en turbinas (extremadamente vulnerables) a menores cantidades relativas de ceniza en el agua.	
Sistemas de propulsión & transmisión	Límites	Sin ceniza en el agua	N/A	Presencia reducida de ceniza en el agua	Gran volumen de ceniza en el agua
	Impacto	Sin daño. Sin interrupción.	N/A	Daños en partes móviles sumergidas (erosión de cojinetes de bujes; abrasión/corrosión de ejes y hélices; daños en dispositivos de control). Funcionalidad comprometida (por exposición a largo plazo) hasta reparación.	Daños en partes móviles sumergidas (erosión de cojinetes de bujes; abrasión/corrosión de ejes y hélices; daños en dispositivos de control). Funcionalidad comprometida hasta reemplazo.
Componentes del casco & obra viva	Límites	Sin ceniza en el agua	Presencia reducida de ceniza en el agua	Gran volumen de ceniza en el agua	N/A
	Impacto	Sin daño. Sin interrupción.	Posible daño abrasivo/corrosivo y crecimiento algal acelerado (por exposición a largo plazo). Posibles demoras para la limpieza.	Posible daño abrasivo/corrosivo y crecimiento algal acelerado. Posibles demoras para el mantenimiento y evitar daños mayores.	N/A

Tabla 3.4a. Escala de Daño y Disrupción para embarcaciones afectadas por caídas de ceniza volcánica y *pumice rafts*. *N/A: no aplica. HVAC: sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. SIC: sistemas de infraestructura crítica.*

DOMINIOS DEL PUERTO		Nivel 0 Sin daños	Nivel 1 Limpieza requerida	Nivel 2 Reparación requerida	Nivel 3 Destrucción total
Dominios terrestres & de evacuación	Límites	<0.1 mm de ceniza	0.1 mm – 5 mm de ceniza	5 mm – 150 mm de ceniza	>150 mm de ceniza
	Impacto	Sin daño. Sin disrupción.	Posible daño leve en maquinaria portuaria para el manejo de cargas y pasajeros (especialmente, en partes móviles). Operaciones portuarias dificultosas por visibilidad atmosférica reducida (todos los dominios); desarrollo de superficies resbalosas; endurecimiento de cabos; algidez; amenaza para la salud de operarios; obturación de tomas y filtros de aire; disrupción de SIC; disrupción de accesibilidades.	Daño severo en maquinaria portuaria para el manejo de cargas y pasajeros (especialmente, en partes móviles); deterioro de superficies expuestas; daños en infraestructura edilicia. Operaciones portuarias restringidas por visibilidad atmosférica reducida (todos los dominios); desarrollo de superficies resbalosas; endurecimiento de cabos; algidez; amenaza para la salud de operarios; obturación de tomas y filtros de aire; disrupción de SIC; disrupción de accesibilidades; ingreso de ceniza en espacios confinados e interiores.	Posible daño estructural en infraestructura edilicia, incluyendo el colapso de techos*. Sepultamiento de accesos. Completamente inoperable.
Dominio marítimo	Límites	<0.1 mm de ceniza	0.1 mm – 20 mm de ceniza	20 mm – 200 mm de ceniza	> 200 mm de ceniza
	Impacto	Sin daño. Sin disrupción.	Operaciones portuarias dificultosas por visibilidad atmosférica reducida (todos los dominios); cubrimiento de señales, boyas, balizas, superficie del agua y líneas de costa. Posibles demoras para la limpieza.	Operaciones portuarias restringidas por visibilidad atmosférica reducida (todos los dominios); sepultamiento de señales, boyas, balizas, superficie del agua y líneas de costa; deterioro de playas y bajada de lanchas; posibles engelamientos; aumento del riesgo de procesos de remoción en masa. Posibles demoras para la remediación.	Posible daño estructural en infraestructura portuaria (muelles, embarcaderos, pantalanes) por aumento de la carga estática vertical. Completamente inoperable.
	Límites	Sin ceniza en el agua	Presencia reducida de ceniza en el agua	Gran volumen de ceniza en el agua	Apilamientos inmensos de ceniza en el agua
	Impacto	Sin daño. Sin disrupción.	Operaciones portuarias dificultosas por visibilidad en el agua reducida; cubrimiento de superficie del agua y líneas de costa. Posibles demoras para la limpieza.	Problemáticas de sedimentación y removilización en bahías y canales; cubrimiento de superficie del agua y líneas de costa; deterioro de playas y bajada de lanchas; posibles engelamientos; aumento del riesgo de procesos de remoción en masa. Posibles demoras para la remediación.	Colmatación y posible abandono de bahías, canales y playas**.

Tabla 3.4b. Escala de Daño y Disrupción para puertos afectados por caídas de ceniza volcánica y *pumice rafts*. *N/A: no aplica. HVAC: sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. SIC: sistemas de infraestructura crítica. *: p. ej., Spence et al. (2005); Wilson et al. (2013); Jenkins et al. (2014). **: p. ej., Blong (1984); SMEC (1997); Salgado et al. (2023).*

Algunos de los ejemplos más reconocidos de escalas de vulnerabilidad incluyen: (1) la Escala de Intensidad de Mercalli Modificada (Dowrick 1996); (2) la Escala Macrosísmica Europea (Grünthal 1993, 1998); (3) la Escala Australiana de Severidad de Ciclones (Crowder 1995); y (4) la Escala Alexander para remoción en masa (Alexander 1989), entre muchos otros. Por otro lado, existen también algunas escalas de vulnerabilidad híbridas, que vinculan las directamente consecuencias de un evento físico con una determinada magnitud de este (p. ej., McCann et al. 1980; Krinitzsky 1993; Berz et al. 2001).

En el campo de la volcanología, existen varios modelos de impactos disponibles para describir las consecuencias que han tenido los peligros volcánicos en la sociedad. Blong (2003a) inició este trabajo registrando los impactos producidos por numerosas erupciones volcánicas, con distintas intensidades de peligro, sobre diversos sectores de la sociedad. Si bien esto no dio lugar a la creación de verdaderas EI, sí se propusieron algunos umbrales básicos de MIP, especialmente para la agricultura. En la actualidad, la gran mayoría de estos modelos están diseñados para describir los daños físicos esperados en edificaciones, a causa de corrientes de densidad piroclástica (Spence et al. 2004; Baxter et al. 2005) o caídas de tefra (Spence et al. 1996; Blong 2003a).

En su trabajo pionero, Blong (2003a) también reconoció la gran variabilidad de impactos que pueden ocurrir a causa de las caídas de ceniza volcánica, lo que se refleja en la gran variabilidad de modelos de impactos disponibles para este tipo específico de peligro volcánico (Hayes et al. 2024). Uno de los primeros antecedentes de esto fue presentado por Johnston (1997), en cuyo trabajo precursor se propusieron distintos *índices de vulnerabilidad* que vinculan espesores de caída piroclástica con la probabilidad de que determinado sector geográfico de Nueva Zelanda "reciba impactos" o "se vuelva directamente inoperable". Hoy en día, existen modelos de impactos que estiman las pérdidas esperadas de cultivos e impactos en actividades agrícolas a partir de distintos espesores de caída piroclástica (p. ej., Neild et al. 1998; Wilson et al. 2009b), e incluso la necesidad de implementar acciones de limpieza en respuesta a caídas de ceniza en áreas urbanas (Hayes et al. 2015).

Entre todos los modelos de impacto disponibles, las Escalas de Daño y Disrupción elaboradas por Wilson et al. (2014a) y Jenkins et al. (2015) se destacan como las más ampliamente utilizadas para describir los efectos de las caídas de ceniza sobre sistemas de infraestructura crítica.

Las EI que aquí se sugieren (**Tablas 3.4a y 3.4b**) se basan en las Escalas de Daño y Disrupción propuestas por Wilson et al. (2014a) para impactos en siete sistemas de infraestructura crítica (redes de suministro eléctrico, de suministro de agua potable, de manejo de aguas residuales, de transporte, de comunicaciones, y componentes críticos de calefacción, ventilación, aire acondicionado y equipamientos electrónicos) para cuatro peligros volcánicos distintos (caídas piroclásticas, corrientes de densidad piroclástica, *lahares* y flujos de lava).

En similitud a esta (Wilson et al. 2014a) y muchas otras EI (Hayes et al. 2024), cada EDD que aquí se sugiere está definido por un determinado *nivel* de GSI y un intervalo de MIP, los cuales son específicos para cada tipo de elemento, sistema o dominio de los buques y los puertos. Cada EDD

está acompañado de breves descriptores cualitativos que grafican, separadamente, los distintos tipos de daño físico y pérdida de funcionamiento observados. Lógicamente, los límites de MIP fueron definidos separadamente para cada tipo de impacto, ya que cada elemento, sistema o dominio respondió de manera diferente a la intensidad de uno u otro peligro.

3.7. Discusión

Las EI son herramientas extremadamente útiles para describir, organizar y condensar los impactos que han causado distintos peligros naturales sobre la sociedad en el pasado (*post-event impact assessment, Post-EIA*; Craig et al. 2016).

Pero las EI son también herramientas muy poderosas para prever las posibles consecuencias de determinado evento físico antes de que este ocurra (*pre-event impact assessment, Pre-EIA*; Craig et al. 2016). Esto es porque cada EDD permite anticipar las características de los impactos según una determinada MIP esperada, en este caso, espesores de caída o abundancia relativa de ceniza volcánica en el agua. Esta capacidad predictiva de las EI representa un recurso vital para la evaluación del riesgo volcánico por caídas piroclásticas (Jenkins et al. 2014; Wilson et al. 2014a).

Sin embargo, la aplicabilidad pre-evento de las EI está sujeta a un gran número de limitaciones y presunciones que deben ser tenidas en cuenta para su implementación.

Por ejemplo, si bien este modelo se basa en una robusta cantidad de observaciones empíricas de impactos, que incluye cuatro erupciones volcánicas significativas, decenas de sitios portuarios damnificados y centenares de buques afectados, la evidencia es aún insuficiente para establecer *límites* de MIP universalmente inequívocos. Esto es porque a diferencia de otras EI (Jenkins et al. 2014; Wilson et al. 2014a) los EDD que aquí se sugieren están basados exclusivamente en observaciones directas y el asesoramiento por parte de expertos, careciendo de ensayos experimentales, simulaciones analíticas o modelados numéricos que permitan acotar la incertidumbre de los límites de MIP sugeridos (Bonadonna 2006; Wadge 2009; Jenkins et al. 2012). Esto sería de especial utilidad para la determinación de los umbrales de MIP necesarios para generar desestabilizaciones en los buques a causa de la carga estática vertical del depósito de ceniza (**sección 3.2.1**), sobre todo, en instancias de acumulaciones extremas (**Tabla 3.3a**).

Otra problemática habitual refiere a la elección de las unidades de MIP más adecuadas para modelar impactos. Si bien existe un consenso relativamente general para las caídas piroclástica (p. ej., Blong 1984; Neild et al. 1998; Wilson et al. 2012a; 2014a; Jenkins et al. 2014), esto no es el caso para *pumice rafts*, u otras amenazas asociadas a la presencia de ceniza volcánica en el agua (**sección 3.6.2**). Estas dificultades se deben a: (1) la gran variedad de fenómenos sin- o post-eruptivos que han afectado el transporte naval de Patagonia, y las dificultades para diferenciar uno del otro; (2) la variabilidad de las características de cada peligro con potencial de causar daño o disrupción en buques y puertos; y (3) las limitaciones existentes para poder medir tales propiedades del fenómeno en el campo (Salgado et al. 2023). En cualquier tipo de evaluación de riesgo o vulnerabilidad, todas

estas condiciones resultan ser vitales para la elección adecuada de una MIP (Wilson et al. 2012a). La escala semántica con la que se definen estas MIP en la **sección 3.6.2**, se basa en términos cualitativos y genéricos (Lehmann et al. 1998) y no permiten establecer límites de peligro definidos, lo cual puede conducir a ambigüedades (Blong 2003a), aunque facilita la aplicabilidad de las EI. Otra dificultad adicional surge de la impronta intermitente y estacional que ha manifestado este tipo particular de peligro volcánico, mucho más prominente que en el caso de las caídas primarias de ceniza volcánica y los eventos de resuspensión eólica.

Al igual que las Escalas de Daño y Disrupción sugeridas por Wilson et al. (2014a), los EDD que aquí se sugieren para las caídas primarias de ceniza volcánica están caracterizados por MIP cuantitativas y continuas (espesor de caída de ceniza volcánica), lo que genera grupos con límites o umbrales precisos. En cambio, la definición de rangos cualitativos y continuos de MIP para los *pumice rafts*, y otros peligros asociados a la presencia de ceniza en el agua, puede conducir a ambigüedades, solapamientos y confusiones respecto a su implementación.

Por otro lado, la ocurrencia simultánea o secuencial de varios peligros volcánicos puede generar impactos más complejos e inesperados según la intensidad de cada peligro (p. ej., Biass et al. 2024). La EI aquí propuesta ignora todas las posibles consecuencias que dos o más peligros volcánicos puedan tener sobre el mismo elemento afectado (p. ej., Zuccaro et al. 2008; Marzocchi et al. 2012; Catto & Dowdy 2021).

Un concepto clave en la elaboración de EI es el uso de GSI máximos para la definición de un EDD. Si bien este método común en la evaluación de impactos (p.ej., Richter 1958; UNDRO 1991; Crowder 1995; etc.), esto puede conducir intrínsecamente a exageraciones en evaluaciones de tipo *pre-EIA*. El uso de GSI mínimos, medios, máximos o modales depende principalmente en el propósito final de la EI, en este caso, advertir sobre los posibles efectos de una erupción volcánica en la náutica y recomendar acciones de preparación, mitigación y remediación efectivas. Por ello, se optó por incluir GSI máximos en la definición de EDD.

Muchas EI no incluyen especificidades sobre el diseño de los sistemas afectados, o sobre la implementación de medidas de prevención y mitigación de impactos, ya que deben balancear entre la inclusión de información detallada y ser lo suficientemente simples para su uso (Blong 2003b). De mismo modo, los EDD aquí propuestos no incluyen detalles referidos a este tipo de factores. Estos, en cambio, se abordan de manera separada en las **secciones 3.2 y 3.3**, (donde se elabora acerca de las características de vulnerabilidad y resiliencia de distintos diseños de elementos, sistemas o dominios afectados); en la **sección 3.5** (donde se evalúan las distintas estrategias de preparación y mitigación implementadas); y en la **sección 4** (donde se recomiendan acciones de preparación y respuesta específicas).

Este modelo de impactos, basado principalmente en evidencias de redes de transporte fluvio-lacustre pequeñas y esencialmente turísticas, puede proporcionar información fundamental y replicable para redes de mayor dimensión, e incluso sentar las bases para la futura evaluación de impactos (de ceniza u otros peligros volcánicos) en ámbitos marítimos (Salgado et al. 2023). Como

tal, aplicar esta EI en casos de estudio futuros permitiría ajustar la precisión de los umbrales de MIP sugeridos y robustecer los descriptores de daño y interrupción asociados a cada EDD, lo cual significaría paso fundamental hacia esquemas universales de EI para el transporte naval. Lamentablemente, los antecedentes de este tipo de prácticas son poco frecuentes en la investigación de todos los peligros naturales (p. ej., Turner et al. 2013; Rossetto & Elnashai 2003; Craig et al. 2016).

En definitiva, este modelo temprano representa la primera EI basada en evidencias para el transporte naval, apoyada en bases empíricas de numerosos sitios portuarios y buques afectados por cuatro erupciones volcánicas y caídas piroclásticas significativas.

Capítulo 4

Transferencia de aprendizajes para el manejo integral de caídas piroclásticas

4.1. Marco de investigación

El aprovechamiento de todos los conocimientos que se generan a partir de experiencias pasadas es esencial para el perfeccionamiento constante de la gestión del riesgo de desastres y el manejo de emergencias. Al examinar tales experiencias, se pueden identificar prácticas efectivas, errores comunes y áreas de mejora, lo que permite fortalecer la preparación y respuesta ante nuevas eventualidades.

Sin embargo, es muy común que los operarios de servicios de infraestructura crítica afectados por caídas piroclásticas reporten no haber contado en su momento con ningún tipo de conocimiento sobre la peligrosidad que una erupción volcánica significa para su sector (Paton et al. 2008).

En concordancia, y sobre un total de 64 operarios entrevistados en Patagonia (**sección 3.1.3**), un rotundo 100% (n: 64) confirmó no haber contado con ningún tipo de conocimiento acerca de los posibles efectos que la ceniza volcánica podría tener en la actividad náutica. Y una proporción equivalente de entidades consultadas (92%; n: 26) también afirmó no haber contado con ningún tipo de asesoramiento respecto a la implementación de estrategias adecuadas para la prevención, mitigación o remediación de impactos. Todos estos vacíos de conocimiento entre los operarios y respondientes resultaron en inacciones o prácticas deficientes que condujeron a situaciones de riesgo extremo y a enormes pérdidas económicas para el sector naval de la Patagonia andina (**sección 2 y 3**).

De manera similar, este tipo de experiencias tampoco suelen servir como un catalítico para la preparación ante futuras emergencias volcánicas (Paton et al. 1998; Johnston et al. 1999). En un breve lapso de 24 años, y aún más notablemente en menos de una década si nos centramos en las últimas tres y más disruptivas erupciones volcánicas, cuatro eventos muy significativos de caída piroclástica afectaron severamente el territorio Patagónico argentino. Y a pesar de esta recurrencia, este mismo trabajo de investigación permitió entrever que absolutamente ninguna de las instituciones consultadas (0%; n: 26) indicó haber documentado por escrito ningún registro asociado a las prácticas que se implementarían en respuesta a la emergencia volcánica (**sección 2.4.3; sección**

3.5). En cambio, estos conocimientos quedaron simplemente preservados como experiencias y saberes individuales de aquellos gestores del transporte involucrados en cada uno de los eventos descriptos con anterioridad (**sección 2.4.3**).

Sorprendentemente, esta situación se verifica a pesar de numerosos intentos de transferencia específicos realizados por el Grupo de Estudios Ambientales, GEA (IPATEC, CONICET/UNCO) con anterioridad a estos eventos de caídas piroclásticas en la región.

Justamente, y entre todos los posibles peligros volcánicos, las caídas piroclásticas suelen estar asociadas a las situaciones más complejas y polifacéticas en términos de impactos para el entorno urbano: la caída de tan solo unos pocos milímetros de tefra pueden desencadenar demandas masivas de información por parte de la sociedad, lo que incluye a los gestores de las redes de transporte (Stewart et al. 2016). Precisamente, esta comunicación de la información acerca de las consecuencias negativas más probables del fenómeno volcánico y las recomendaciones sobre cómo prevenir y mitigar sus impactos constituye uno de los pilares fundamentales de la reducción del riesgo de desastres (Paton et al. 2008; UNISDR 2011).

A pesar de todo ello, todas las acciones de respuesta a la emergencia (**sección 2**) y cualquier estrategia para la mitigación y remediación de impactos (**sección 3**) que se relevaron para la composición de este trabajo de investigación, resultaron ser primordialmente improvisadas y pobremente comunicadas entre las autoridades y los operarios de puertos y embarcaciones.

4.1.1. Antecedentes

En la actualidad, existe un número cada vez más asiduo de casos en los que la correcta implementación de medidas de preparación y mitigación disminuyeran significativamente los efectos negativos del volcanismo (Wilson et al. 2014b). Estos casos de éxito suelen ser más comunes entre las comunidades que son frecuentemente afectadas por caídas de ceniza volcánica, lo que permite a los operarios de servicios de infraestructura crítica adquirir experiencias y adaptar y mejorar sus estrategias de manejo (p. ej., Durand et al. 2001; Wardman et al. 2012c, Sword-Daniels et al. 2014).

Pero alentar a las organizaciones y a los operarios de infraestructura crítica a adoptar estas mismas estrategias en regiones donde las erupciones volcánicas son percibidas como eventos extremadamente infrecuentes (Paton et al. 1998) suele ser una labor mucho compleja (p. ej., Alexander 2007; Few & Barclay 2011; McBean 2012).

En 1995, la crisis asociada a la erupción del volcán Ruapehu puso de manifiesto en Nueva Zelanda una serie de problemáticas organizacionales preexistentes (**sección 2.3.3**) entre las distintas instituciones y jurisdicciones involucradas en el manejo de la emergencia (Paton et al. 1998; Johnston et al. 2000; Leonard et al. 2008). En los cinco a diez años subsiguientes, y a raíz de esta experiencia poco exitosa, se realizaron en el país una serie de progresos en materia de preparación, legislación, comunicación y manejo de emergencias (Wilson et al. 2014b). Estos cambios buscaban lograr un enfoque más coordinado e integrado entre la gestión de desastres, las instituciones científicas especializadas en materia de riesgo volcánico y manejo de emergencias y los operarios

de infraestructuras críticas.

Entre todos estos avances, Wilson et al. (2014b) describen particularmente los procesos colaborativos mediante los cuales confeccionaron una serie de recursos de transferencia de lecciones aprendidas en formato de *posters*, inicialmente destinados para asesorar a organismos de servicios de infraestructura crítica de Nueva Zelanda en caso de erupciones volcánicas.

Muy prontamente, estos dispositivos fueron luego internacionalizados por la *Cities and Volcanoes Commission's Volcanic Ash Impacts Working Group* y puestos a disposición a través de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos, la USGS (<http://volcanoes.usgs.gov/ash/index.htm>). Estos *posters* ofrecen información concisa sobre los posibles impactos de las caídas de ceniza volcánica para distintos sistemas de infraestructura crítica, así como recomendaciones sobre prácticas adecuadas para que los administradores se preparen, respondan y recuperen de manera más rápida, segura y efectiva.

La primera serie de *posters* se completó en el año 2010 para cinco sistemas de infraestructura crítica, incluyendo: (1) redes de transporte vial; (2) aeropuertos; (3) redes de energía eléctrica; (4) sistemas de suministro de agua potable; y (5) sistemas para el manejo de aguas residuales. Sin embargo, rápidamente se extendieron para actualizar sus contenidos, surgidos a partir de nuevas investigaciones de impactos por erupciones volcánicas alrededor del mundo (Wilson et al. 2012a), e incorporar nuevos sectores de infraestructura crítica, incluyendo: (1) recomendaciones para la limpieza de la ceniza volcánica en ámbitos urbanos; (2) impactos en infraestructura edilicia; (3) sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) y generadores de energía de emergencia; (4) computadoras y dispositivos electrónicos; y subdividir el antiguo poster sobre redes de energía eléctrica para separar (5) plantas de generación de energía eléctrica y (6) sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica.

La necesidad de desarrollar recursos de este estilo se hizo evidente durante la erupción del volcán Chaitén de 2008. La caída de ~5 mm de ceniza riolítica fina en la localidad de Esquel (Provincia de Chubut) generó una inmediata preocupación entre las autoridades y la población local por la posible contaminación del suministro de agua potable. Los primeros análisis de elementos lixiviables en muestras de ceniza volcánica fueron gestionados por integrantes del Grupo de Estudios Ambientales, GEA (IPATEC, CONICET/UNCO), a cargo del comité científico del COE de Esquel. El muestreo de agua de red y la interpretación del análisis de elementos lixiviables permitieron establecer que los aumentos registrados de sulfatos, hierro y aluminio detectados eran suficientes para generar un gusto metálico perceptible, pero que sus concentraciones se mantenían significativamente por debajo de los límites establecidos en el Artículo 982 del Código Alimentario Argentino (<https://www.argentina.gob.ar/anmat>).

Estos aprendizajes fueron posteriormente reflejados en el *poster "Advice for water supply managers"* (Wilson et al. 2014b) facilitando la implementación de sugerencias fundamentales sobre los impactos y estrategias de mitigación del riesgo para el suministro de agua potable en casos de caídas piroclásticas (Stewart et al. 2009).

4.1.2. Objetivos específicos

A partir de estos precedentes y con el fin de transferir efectivamente los contenidos hasta aquí elaborados en materia de impactos de ceniza volcánica (**sección 3**) y manejo de emergencias volcánica (**sección 2**), en este capítulo se pretende:

- Explorar e identificar posibles vías de transferencia de lecciones aprendidas a los sectores náutico y del manejo de la emergencia de Patagonia andina.
- Elaborar un dispositivo de transferencia que compile información concisa acerca de los impactos de la ceniza volcánica sobre los sistemas de transporte naval de Patagonia y que provea recomendaciones sobre prácticas adecuadas para la prevención, mitigación y remediación de daños.
- Evaluar la pertinencia, adecuación y aplicabilidad del dispositivo entre posibles futuros usuarios (operarios de puertos y embarcaciones).
- Concretar la transferencia efectiva del producto final entre los operarios de puertos y embarcaciones de Patagonia y poner a disposición de otros posibles futuros usuarios.

4.2. Elaboración de un nuevo dispositivo de transferencia

En las siguientes secciones se describe el flujo de trabajo (**Figura 4.1**) que permitió gestar, confeccionar e incorporar en los sistemas locales y regionales de manejo y prevención de desastres, el afiche de aviso “*Ceniza volcánica: avisos para el sector náutico*” (**Figura 4.2**).

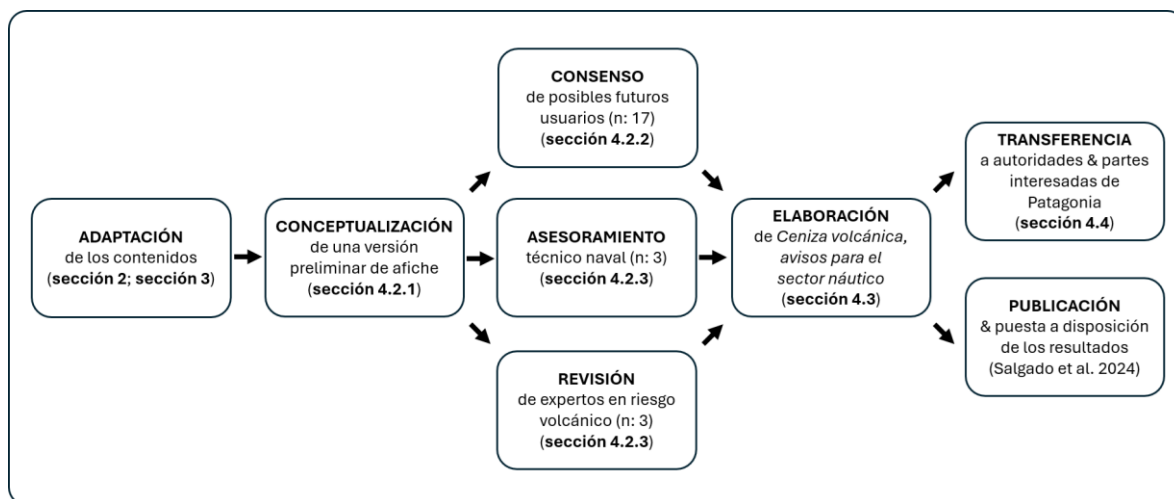


Figura 4.1. Diagrama del flujo de trabajo colaborativo para la elaboración del afiche Ceniza volcánica, avisos para el sector náutico (versión 1, junio de 2023).

4.2.1. Conceptualización del afiche

La decisión de utilizar un afiche como vía de comunicación se basa en la idea original de Wilson et al. (2014b) (**sección 4.1.1**). En su amplia experiencia, Wilson et al. (2014b) notaron que justamente las fuentes de consulta concisas y de fácil abordaje resultan ser las efectivas al momento de comunicar recomendaciones en situación de emergencia. Por el contrario, los recursos más extensos y detallados suelen ser más adecuados para la comunicación en periodos o coyunturas de pre-evento (Lindell & Perry 1992; Perry & Lindell 2007; Phillips 2013).

Siguiendo estos principios, se procedió a condensar y reorganizar los contenidos elaborados en las secciones anteriores (**sección 2** y **sección 3**) para presentarlos en un afiche. Toda esta información fue reestructurada en forma de un listado que organiza conceptos sencillos, claros y categóricos, facilitando su rápida comprensión en situaciones de emergencia. El mensaje fue reelaborado con un lenguaje accesible, específicamente destinado a ser comprendido por los posibles futuros usuarios.

La información, previamente estructurada según *tipos* de impacto (**sección 3.2** a **sección 3.5**), fue entonces reorganizada en cuatro secciones principales según la instancia respecto al evento eruptivo: antes, durante o después de la caída de ceniza volcánica (**sección 4.3.1**).

4.2.2. Consenso de posibles usuarios

A inicios de 2023, se elaboró una versión preliminar del afiche con la intención de someterla a pequeños ensayos de testeo. Para ello, se diseñó una segunda ronda de entrevistas con algunas de las partes consultadas anteriormente (**sección 2.1.3** y **3.1.3**) con el objetivo de presentar esta versión preliminar y obtener sugerencias de adecuación o mejora.

Del grupo original de 62 personas entrevistadas, se seleccionó un subgrupo reducido de posibles futuros usuarios del afiche (*role-driven interviews*) compuesto por 17 autoridades, tomadores de decisiones u operarios (n: 17) pertenecientes a 12 organismos o instituciones diferentes (n: 12). Este subgrupo fue entrevistado nuevamente entre enero de 2023 y abril de 2023. Las entrevistas, diseñadas con un carácter semi-estructurado, se realizaron de forma presencial en el lugar de trabajo de los informantes y continuadas por telecomunicaciones cuando fuera necesario.

En términos generales, se consultó acerca a: (1) la factibilidad de implementación del recurso ante futuras caídas piroclásticas; (2) la posibilidad de incorporar el afiche en manuales de procedimientos o protocolos de acción preexistentes del organismo consultado; (3) la claridad, relevancia y nivel de detalle con el que se presentan los contenidos; (4) la adecuación del lenguaje técnico y la terminología específica empleada; (5) la adecuación del diseño gráfico; y (6) la conveniencia de utilizar distintos tipos de soporte (digital y/o físico) para el afiche.

Este consenso permitió incluir activamente a los operarios de puertos y embarcaciones en un proceso participativo y colaborativo de construcción del afiche, un componente vital en los esfuerzos de reducción del riesgo de desastres (ICSU 2008; Linnerooth-Bayer et al. 2016).

4.2.3. Revisión de expertos & Asesoramiento técnico

Además del consenso por parte de los usuarios (**sección 4.2.2**), también se procuró obtener consejos y sugerencias de mejora en materia de comunicación del riesgo y aspectos náutico-técnicos.

La versión preliminar de afiche fue puesta a disposición de dos científicos especialistas en riesgo volcánico, con amplia experiencia y trayectoria en el país, quienes revisaron el recurso en cuestión y brindaron consejo y sugerencias de mejora. En adición, se contó con el continuo asesoramiento brindado por la Dra. C. Stewart, quien participó en la confección de la serie original de pósteres descrita en Wilson et al. (2014b). También se recibió asesoramiento de tres profesionales expertos en ciencias náuticas, ingeniería marítima y mecánica naval, sobre la adecuación y factibilidad de implementación de las recomendaciones sugeridas.

Todas estas revisiones fueron posteriormente integradas a las sugerencias de los posibles futuros usuarios (**sección 4.2.2**) y conceptualizadas para ser incluidas en una versión definitiva del afiche (**sección 4.3**).

4.3. Resultados: el afiche *Ceniza volcánica, avisos para el sector náutico*

A continuación, se presenta y describe la versión definitiva del afiche *Ceniza volcánica, avisos para el sector náutico, versión 1, junio de 2023* (Salgado et al. 2024). Este afiche consiste en una cartelería diseñada para su impresión en tamaño A2 o proporcionales, o en formato digital, para facilitar el acceso y la transmisión entre los posibles usuarios. Los contenidos están organizados en cuatro partes principales, divididas a su vez en subsecciones, con el fin de simplificar la visualización de la información según los requerimientos del usuario en el momento de la consulta.

4.3.1. Las partes del afiche

¿Qué sucede durante una caída de ceniza volcánica?

A diferencia de otros sistemas de transporte (Wilson et al. 2012a), la navegación náutica ha demostrado ser particularmente vulnerable a un número de peligros volcánicos secundarios, asociados a la caída piroclástica primaria (Salgado et al. 2023). Estos procesos *syn-* y *post-*eruptivos demostraron un gran potencial de causar daños y interrupciones extensas y persistentes en la navegación, de maneras no previstas o poco intuitivas por parte de los operarios de puertos y embarcaciones.

La primera parte del afiche tiene como objetivo entonces ilustrar esta diversidad de procesos mediante un diagrama en bloque sencillo, distinguiendo los posibles destinos de la ceniza volcánica en vías navegables fluvio-lacustres.

La necesidad de incorporar esta sección específica al afiche fue especialmente reafirmada por los posibles futuros usuarios (88.2%; n: 17) durante la segunda ronda de entrevistas (**sección 4.2.2**).

Ceniza Volcánica

AVISOS PARA EL SECTOR NÁUTICO

QUÉ SUCEDE DURANTE UNA CAÍDA DE CENIZA

La ceniza volcánica puede:

Caer y Depositarse
Cubriendo las superficies expuestas de puertos, barcos, rutas o edificios.

Acumularse
En las costas de los lagos por acción del viento y el oleaje.

Transportarse

Por ríos o arroyos. Durante la estación lluviosa, el agua puede remobilizar la ceniza depositada cerca de los cursos de agua y renovar el aporte de ceniza a los lagos.

Flotar

Sobre la superficie del agua, formando espesas islas de ceniza que pueden quedar a la deriva por hasta varios meses.

Hundirse

Y asentarse en el fondo de los puertos, bahías o cualquier vía navegable.

Removilizarse

Además del agua y el viento, el tráfico de las embarcaciones también puede volver a movilizar la ceniza asentada en los lechos.

EFFECTOS NEGATIVOS

En los Puertos

- Obstaculización de la operatividad por:

Baja visibilidad por presencia de ceniza en el aire o cubriendo señales y balizado.

Condiciones de **trabajo dificultosas** y peligro para la **salud** de operarios y pasajeros.

Interrupción de **servicios críticos** como el suministro eléctrico, comunicaciones, accesos viales.

Ingreso de ceniza en flotación en bahías y canales.

Riesgo de obturación y daño de sistemas con **toma de agua de mar** en las embarcaciones.

- Abrasión y corrosión** de superficies expuestas, equipos y maquinaria; **contaminación** de la provisión de combustible.

- Daños en **infraestructura** en casos de acumulación extrema, agravado por lluvia o nieve.

- Septatamiento** de dársenas, playas, bajadas de lanchas, accesos viales.

- Pérdida de **calado** por acumulación de ceniza en los lechos.

En las Embarcaciones

- Obstaculización de la **navegabilidad** por:

Baja visibilidad por presencia de ceniza en el aire o cubriendo ventanas y parabrisas.

Atenuación de **señales** y pérdida de posicionamiento o comunicaciones.

Condiciones de **trabajo dificultosas** y peligro para la **salud** de tripulación y pasajeros.

- Daño en superficies y equipo de **cubierta**.

- Ingreso de ceniza fina en **espacios cerrados** y daños en sala de control, de máquinas, cabina de pasajeros (p. ej., fallos en sistemas de navegación y comunicación).

- Efectos de **carga vertical adicional** por ceniza en cubierta (agravada por lluvias y nieve): desestabilidad, vaivén vertical o transversal, escorrido, zozobrado; rompimiento de amarras; colapso de cabinas de lona.

- Obturbación y daño de sistemas sistemas con **toma de agua de mar** (turbinas, refrigeración, lastre, lucha contra incendios, agua doméstica) por presencia de ceniza en el agua.

- Daños en **partes móviles sumergidas** (sistemas de propulsión y transmisión).

- Abrasión, corrosión y crecimiento algal acelerados en los **cascos**.

CÓMO PREPARARSE

Elaborar **planes de respuesta** que contemplen:

- La **restricción** de la navegación.
- El **retorno** o el **desvío** y **refugio** de barcos.
- La **evacuación** y/o **auxilio preventivo** de personas en áreas remotas. El tráfico aéreo y terrestre también pueden obstaculizarse.

Identificar y procurarse de **suministros y recursos** necesarios para:

- Retirar del agua** (de ser posible) las embarcaciones y albergarlas bajo techo.
- Proteger** cubierta, motores, equipos y maquinaria; sellar aberturas en barcos y edificios (cobertores de lona, envolturas plásticas, cinta).
- Impedir **ingresos de ceniza flotante** al puerto.
- Despejar** la ceniza de los **exteriores** del barco (escobas, cepillos, palas, baldes, agua a presión de sistemas de lastre, sentina o lucha contra incendios).

- Despejar** la ceniza de los **interiores** del barco (cepillos, aspiradoras, paños, inyección de aire a baja presión).
- Despejar** la ceniza ingerida por circuitos con tomas de agua de mar y reemplazar filtros.
- Despejar** la ceniza de los **exteriores** del puerto (escobas, palas, baldes, agua a presión; podría requerirse maquinaria pesada).
- Remediar** profundidades de **calado** en bahías y fondeaderos (podría requerirse dragar).
- Proveer** a tripulación y operarios con **elementos de protección personal**.

Identificar posibles **sitios de acopio** para la ceniza y evitar su posterior removilización. Se desalienta fuertemente arrojar ceniza al agua.

DÓNDE ENCONTRAR AVISO

Consulte los sitios web del observatorio volcanológico local, el servicio meteorológico nacional, y/o agencias de manejo de emergencias.

CÓMO ACTUAR

Durante la caída de ceniza

- Activar **planes de respuesta** previstos con anticipación (ver: CÓMO PREPARARSE).
- La actividad debe ser suspendida de inmediato. Sin embargo el transporte puede ser requerido para evacuar, auxiliar, o recuperar sitios afectados. En caso de no ser posible el cese de actividades:

Proveer a tripulación y operarios con **elementos de protección personal** (ropa larga que cubra brazos y piernas, respiradores N95, gafas sin aberturas laterales, calzado rígido, guantes).

Minimizar la **exposición** de tripulación y embarcaciones a la ceniza.

Instalar **filtros extra** en tomas y circuitos de mar; el flujo de agua y estado de filtros en sistemas de refrigeración debe ser examinado constantemente; monitorear el flujo de agua de testigos en fuera de borda.

Evitar rotundamente el uso de **turbinas** en aguas afectadas con ceniza.

- La **remoción** de ceniza en puertos puede **demorarse** hasta que la caída haya culminado.
- Las **embarcaciones** que quedaran a la intemperie requerirán de **limpieza** más frecuente y exhaustiva a fin de evitar inconvenientes adicionales.

Culminada la caída de ceniza

- Evitar** la **navegación** en sitios donde se verificaran eventos de **removilización** de ceniza.
- Remover la ceniza remanente en **cubiertas** al reiniciar actividades; lavar **vidrios** para evitar abrasión; limpiar y/o reemplazar **filtros** de aire, agua y aceite regularmente.
- Limpiar la ceniza de los **interiores** del barco para evitar daños en electrónica y mobiliaria.
- Verificar **elementos móviles sumergidos** en los sistemas de propulsión y transmisión.
- Remover y limpiar la ceniza que quedara acumulada en **facilidades portuarias**.
- Asegurar profundidades de **calado** adecuadas.

OTRAS FUENTES



Información extendida de impactos en el transporte naval



Acceso a otros pósters complementarios



Efectos de la ceniza volcánica sobre la salud



Enciclopedia de impactos y mitigación de ceniza volcánica

Figura 4.2. Previsualización de la versión definitiva del afiche Ceniza volcánica, avisos para el sector náutico (versión 1, junio de 2023).

Efectos de la ceniza volcánica

La segunda parte del afiche enumera los posibles impactos de la ceniza volcánica sobre los puertos (**sección 3.3**) y los buques (**sección 3.2**). En ambos casos, los contenidos se organizan según tipo de impacto (disrupción en la operatividad/navegabilidad o daño físico) y según el dominio o sistema afectado, sin especificaciones respecto a los distintos grados de severidad de impacto (GSI) o medidas de intensidad del peligro (MIP) asociadas (**sección 3.6**).

Cómo prepararse

Hasta aquí, la revisión de casos de estudio puso en manifiesto, por un lado, una profunda falta de conocimientos respecto al riesgo de las erupciones volcánicas explosivas para la navegación interna de Patagonia. Pero, por otro lado, permitió también identificar una serie de medidas de preparación exitosas y relativamente sencillas de incorporar a los sistemas vigentes de transporte naval.

Estas medidas incluyen, principalmente: (1) la elaboración de planes de respuesta a la emergencia, que contemplen medidas como la restricción de la navegación, retornos o desvíos seguros de las embarcaciones, evacuaciones o auxilio preventivo de personas y/o ganado, primordialmente, en sitios remotos con accesos terrestres limitados, entre otros; (2) la identificación y disposición de los recursos y suministros necesarios para salvaguardar embarcaciones, proteger equipamiento e infraestructura, y poner en marcha operativos de limpieza o remediación, etc.; y (3) la identificación de posibles sitios de acopio para el material piroclástico producto de, por ejemplo, la limpieza o el dragado.

Estas sugerencias están diseñadas como directrices generales, con el propósito fundamental de garantizar su versatilidad y asegurar que puedan ser útiles y aplicables de manera efectiva por una amplia variedad de entidades y organizaciones.

Cómo actuar

Todos los esfuerzos de respuesta (**sección 2.2**) y mitigación (**sección 3.5**) identificados en los casos de estudio mostraron resultados diversos en cuanto a su suficiencia para reducir los efectos adversos del fenómeno. Algunas medidas, como la retirada de embarcaciones y la restricción de la navegación, resultaron efectivas en la reducción de riesgos (**sección 3.5.1**). Sin embargo, estrategias como la instalación de barreras de contención o el uso de filtros en circuitos de *agua de mar* tuvieron resultados inconsistentes (**sección 3.5.2**; **sección 3.5.5**).

Un aspecto interesante que surge de este análisis es la importancia del momento específico en que se realizan estas acciones. Por ejemplo, el apremio por despejar el material piroclástico acumulado en los puertos llevó a la necesidad de repetir estos operativos numerosas veces, sin mayores implicancias en el grado de severidad de impacto observado. Mientras que, por otro lado, el despeje periódico de ceniza acumulada en los buques resultó ser un factor crítico para mitigar

daños en la cubierta e incluso prevenir impactos extremos como hundimientos (**sección 3.5.3; sección 3.5.4**).

Por lo tanto, esta parte del afiche sugiere una guía de recomendaciones estructuradas para actuar *durante y después* de la caída de ceniza volcánica, considerando también la contención de impactos en otros servicios de infraestructura crítica (*cascading effects*; Sword-Daniels et al. 2010) que podrían tener consecuencias directas o indirectas en la navegación, como la disrupción de los accesos viales (**sección 2.3.2**).

Acceso a fuentes de aviso y material complementario

Durante una emergencia, las comunidades a menudo reciben alertas y recomendaciones de fuentes informales, las cuales pueden diferir de las fuentes oficiales y generar confusión y desconfianza, lo que incluye a los operarios de sistemas de infraestructura crítica (Haynes et al. 2008). Por esta razón, el afiche incluye también enlaces a sitios web regionales de confianza, incluyendo el Observatorio Argentino de Vigilancia Volcánica (OAVV-SEGEMAR; <https://oavv.segemar.gob.ar/>), el Servicio Meteorológico Nacional Argentino (<https://ssl.smn.gob.ar/vaac/buenosaires/inicio.php?lang=es>) y distintas agencias de gestión de emergencias.

Además, considerando la necesidad de presentar esta guía de recomendaciones de manera expedita, el afiche ofrece también acceso a otros materiales de consulta, donde se puede hallar: (1) información extendida sobre impactos y mitigación de ceniza volcánica en servicios de infraestructura crítica (https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/) y (2) sistemas de transporte naval (<http://ivolcanica.org/ojs/index.php/volcanica/article/view/186>); (3) acceso a otros pósteres complementarios (https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/resources.html); y (4) información sobre los efectos de los peligros volcánicos para la salud (<https://ivhnn.org/home>).

Estos recursos están disponibles como enlaces web en la versión digital del afiche o como códigos QR (*Quick Response code*) en la versión impresa, facilitando así su acceso y consulta por parte de los usuarios.

4.4. Transferencia

En el país, las acciones para reducir riesgos, gestionar crisis y manejar la recuperación están coordinadas a través del Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil. Este sistema articula el funcionamiento de la sociedad civil con los distintos organismos gubernamentales, desde el nivel nacional hasta el municipal, así como también organizaciones no gubernamentales (Ley 27.287). A la fecha, y en concordancia, el afiche se ha distribuido eficazmente a las Direcciones de Protección Civil de varios municipios afectados por al menos uno de los eventos de caída de ceniza volcánica estudiados, lo que incluye a San Martín de Los Andes, Villa La Angostura, San Carlos de Bariloche y Defensa Civil de Lago Puelo.

También se ha compartido con organismos reguladores del transporte náutico en Patagonia, tales como la Administración de Parques Nacionales Lanín, Arrayanes, Nahuel Huapi y Los Alerces; Prefectura Naval Argentina de San Martín de Los Andes, Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche; y los Clubes Náuticos de San Martín de Los Andes y San Carlos de Bariloche.

Además, el afiche también fue puesto a disposición de varias entidades privadas vinculadas al turismo lacustre, incluyendo alrededor de 10 empresas y asociaciones de servicios turísticos. Varios de estos entes expresaron su interés en incorporar el afiche en sus propios manuales, protocolos o planes de gestión interna, preexistentes o en elaboración, ya que ninguno de ellos contemplaba acciones de respuesta en casos de caídas de ceniza volcánica que afectaran la actividad naval.

4.5. Discusión

El afiche *Ceniza volcánica, avisos para el sector náutico* (Salgado et al. 2024) constituye una valiosa herramienta, única en su tipo, para la reducción del riesgo de desastres en el ámbito náutico. Sin embargo, es esencial reconocer ciertas limitaciones y consideraciones especiales que merecen atención.

Los contenidos de este afiche se basan en estudios de casos principalmente relevados en la región de la Patagonia argentina, lo que da lugar a conceptos y terminologías que son específicos para esta área geográfica. De todos modos, y a pesar de esta naturaleza esencialmente local, la transferencia de esta información para su uso en otras regiones o contextos, incluso en el ámbito marítimo, podría representar un primer avance hacia la creación de redes de transporte más resilientes frente a los peligros volcánicos, dada la inexistencia de recursos de esta índole.

La aplicabilidad de esta primera versión del afiche aún no ha podido ser verificada en casos de nuevas caídas de ceniza volcánica. Sin embargo, muy recientemente el afiche sí pudo ser transferido con éxito, como parte de un conjunto de recursos para el asesoramiento en caso de caídas piroclásticas, a integrantes de la Dirección Ejecutiva y el Departamento de Volcanología del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) por parte del *IAVCEI Volcanic Ashfall Impacts Working Group*, en el contexto de la erupción del volcán Concepción del 16 de mayo de 2024. Según el INETER y el *Volcanic Ash Advisory Center* (VAAC) de Washington, la columna de ceniza alcanzó una altura de aproximadamente 5.5 km sobre el nivel del mar, desplazándose principalmente hacia el noroeste del volcán y causando caídas de ceniza de hasta 1 mm de espesor en varias localidades de la región. Esto incluyendo a los numerosos puertos internos del Lago Cocibolca, donde se erige la isla de Ometepe, conformada por los volcanes Concepción y Maderas. Al presente, se continúa trabajando en la tarea de transferir y difundir el afiche entre operarios de puertos y embarcaciones fuera del ámbito local. Con esto, se espera que la aplicación del afiche en futuras situaciones de emergencia volcánica contribuya a ampliar, ajustar y perfeccionar las recomendaciones proporcionadas.

Como se mencionó previamente (**sección 4.3.1**), es importante reiterar que el afiche no proporciona ningún tipo de especificación respecto a distintos grados de severidad de impacto (GSI) o medidas de intensidad del peligro (MIP) necesarias para causar tal severidad de daño o interrupción (**sección 3.6**). En cambio, los descriptores cualitativos de impactos se presentan de manera genérica, caracterizando los efectos de la ceniza volcánica en puertos y embarcaciones en todo su posible espectro de severidad.

El afiche tampoco proporciona propuestas específicas relacionadas con adaptaciones o soluciones ingenieriles para abordar cada una de las problemáticas (Deligne et al. 2022). En su lugar, se ofrecen algunas recomendaciones y pautas de mejoras a incorporar, identificando sistemas y elementos particularmente vulnerables a los efectos de la ceniza que requieran atención especial. Estas sugerencias están diseñadas como directrices generales, con el propósito fundamental de garantizar su versatilidad y asegurar que puedan ser útiles y aplicables por una amplia variedad de entidades y organizaciones.

Otro aspecto interesante para destacar ha sido el notable interés mostrado por los posibles futuros usuarios en exhibir el afiche al público en general. Durante la segunda etapa de entrevistas (**sección 4.2.2**) al ser consultados sobre los posibles usos específicos del afiche, muchos consultados expresaron en al menos una instancia (82.3%; n: 17) la intención de exhibirlo lugares frecuentados por visitantes, como puertos, embarcaciones y otras áreas turísticas, con el fin de concienciar a la población sobre las posibles consecuencias de la actividad volcánica en la región. Esta estrategia ha demostrado ser eficaz en el pasado como una herramienta de comunicación del riesgo basada en el territorio, ya que puede alcanzar a un gran número de residentes y visitantes que no necesariamente buscan informarse sobre el tema (Rouquette et al. 2023). Es importante destacar que la percepción incompleta del riesgo volcánico en diversas comunidades de la Patagonia ya se había identificado como una problemática recurrente en las sucesivas caídas de ceniza que afectaron la región.

Muchos otros usuarios (58.8%; n: 17) también destacaron el valor potencial del afiche para la comunicación del riesgo en ámbitos ajenos al náutico, como por ejemplo el ámbito educativo local (escuelas, instituciones de educación terciaria y universidades). En efecto, el afiche forma actualmente parte regular en la agenda de actividades de extensión, difusión y educación en las que participa el Grupo de Estudios Ambientales, GEA (IPATEC, CONICET/UNCO). Sin embargo, es importante señalar que este recurso no fue diseñado con esos fines específicos, lo que subraya la necesidad de elaborar y difundir materiales específicos para la sensibilización y comunicación de la problemática. Un ejemplo de ello es el tríptico *“Caída de ceniza volcánica en Bariloche y alrededores ¿Qué debemos saber?”*, elaborado por el mismo grupo de trabajo y puesto a disposición de autoridades, comunicadores y la comunidad en general desde 2002.

Capítulo 5

Consideraciones finales

5.1. Resumen de conclusiones

Las caídas piroclásticas de cuatro erupciones recientes sobre el territorio patagónico argentino han puesto en evidencia el papel fundamental que desempeña el transporte naval, no sólo para la economía regional, sino también para la gestión eficaz de las diversas situaciones de emergencia que afectan la región. Sin embargo, y paradójicamente, tanto puertos como embarcaciones han demostrado también ser particularmente vulnerables a los efectos de las caídas de ceniza volcánica, y otros tipos de peligros volcánicos asociados. Incluso se ha observado que los impactos provocados por estos eventos han perdurado por décadas después de finalizadas las erupciones volcánicas, y que se extendieron más allá de las zonas inicialmente afectadas por las caídas piroclásticas primarias.

La evidencia de estas problemáticas en Patagonia se extiende a más de un siglo en el pasado y, sin embargo, no existen registros que den cuenta sobre las múltiples interrelaciones que existen entre el fenómeno volcánico y los emblemáticos sistemas de transporte naval de la Patagonia argentina.

Desde entonces, el alarmante crecimiento urbano poco planificado, la ocupación de áreas recurrentemente afectadas por distintos tipos de peligros naturales y la intensificación de las actividades turísticas en la región implica que es cada vez más importante comprender cómo responderán los distintos componentes del transporte naval ante futuros eventos volcánicos. El objetivo póstumo de esta tesis doctoral ha sido abordar esta falta de conocimientos que, sorprendentemente, se replica a escala global.

Esto se ha logrado mediante la reconstrucción y el análisis multimetodológico de numerosos casos de estudio que incluyen cuatro erupciones volcánicas explosivas recientes (las erupciones de los volcanes Hudson de 1991, Chaitén de 2008, Cordón Caulle de 2011-2012 y Calbuco de 2015), y otras situaciones de emergencia derivadas de otros tipos de peligros geometeorológicos (p. ej., el prolongado aislamiento vial de Villa La Angostura durante el invierno de 2019).

En primera instancia (**Capítulo 2** y **Anexo A**), se propuso evaluar la capacidad de los recursos de transporte naval de la Patagonia andina para dar respuesta a situaciones de desastre.

En el **Anexo 2** se resumieron, de manera narrativa y detallada, un total de 19 casos de acciones de respuesta a la emergencia que se realizarán por vías de transporte naval, asociadas a cinco eventos recientes. Esto se logró a partir de visitas de reconocimiento a sitios afectados; reuniones y entrevistas de investigación semi-estructuradas y dirigidas con 52 partes afectadas, pertenecientes a 24 entidades u organizaciones diferentes; y la consulta de fuentes de información complementaria.

En el **Capítulo 2**, todos estos casos de estudio fueron sistematizados y cotejados según un nuevo modelo para la tipificación de acciones de respuesta naval a la emergencia, sustentado en ocho funciones básicas del manejo de emergencias.

El análisis sistemático de casos permitió identificar una serie de problemáticas recurrentes que limitan la posibilidad de gestionar este tipo de situaciones por medios náuticos, las cuales se han agrupado en cinco aspectos principales: (1) aspectos asociados a los peligros; (2) aspectos asociados a las accesibilidades territoriales; (3) aspectos intra e interorganizacionales; (4) aspectos demográficos; y (5) aspectos de vulnerabilidad de los sistemas de transporte naval a los efectos de las caídas piroclásticas y otros peligros asociados. Colectivamente, todas estas nociones exponen las limitaciones existentes para el manejar situaciones de emergencia y recuperación por medio de los recursos navales disponibles en la Patagonia andina. Esta investigación permitió entonces reconocer, de manera empírica, la influencia de numerosas limitantes que usualmente obstaculizan acciones de respuesta o de recuperación por otros medios de transporte, y la identificación de nuevas problemáticas específicas para el transporte naval y para la Patagonia andina.

A partir de esta identificación de problemáticas recurrentes, se ha podido enumerar una serie de recomendaciones replicables, basadas en los principios fundamentales de la gestión de desastres, que permiten abordar la planificación de futuras eventualidades por medios navales. Estas incluyen: (1) la identificación y caracterización de todos los peligros que amenazan la región, incluyendo el desarrollo de mapas de peligrosidad que contemplen, particularmente, la impronta de escenarios de tipo *multi-hazard*; (2) la evaluación de accesibilidades territoriales, tanto viales como navales, para identificar áreas con mayor riesgo de aislamiento, y de grupos con movilidad particularmente reducida; (3) la introducción de un relevamiento censal continuo de poblaciones con mayor riesgo de aislamiento para dimensionar las acciones de respuesta, especialmente en sitios turísticos, zonas rurales y urbanas con crecimientos desmedidos; (4) la caracterización demográfica de estas poblaciones expuestas, para identificar factores de vulnerabilidad críticos en caso de responder por medios navales; (5) la integración del transporte naval a redes viales e infraestructuras críticas, formalizando su uso en planes integrales de respuesta a emergencias; (6) el acople inter e intra-organizacional de todas las partes involucradas en la gestión del riesgo y manejo de emergencias; y (7) la investigación sobre la vulnerabilidad de los sistemas de transporte naval frente a caídas de ceniza volcánica y otros peligros asociados.

En el **Capítulo 3** se evaluaron los múltiples impactos que han tenido las caídas piroclásticas sobre cada uno de los elementos que componen una red de transporte naval; la peligrosidad que representan para estos sistemas otros fenómenos secundarios, asociados a la caída primaria de ceniza volcánica; la efectividad de distintas estrategias de prevención, mitigación y remediación de daños; y la correlación existente entre medidas de intensidad de peligro y grados de severidad de impactos asociados.

A partir de visitas de reconocimiento a sitios afectados; reuniones y entrevistas de investigación semi-estructuradas y dirigidas con 64 partes afectadas, pertenecientes a 26 entidades u organizaciones diferentes; inspecciones guiadas de activos y elementos mecánicos afectados; el asesoramiento y consejo de expertos técnicos en ciencias náuticas, ingeniería marítima, mecánica y arquitectura naval; y la determinación de distintas medidas de intensidad del peligro, se identificaron, sistematizaron y describieron los impactos de caídas piroclásticas y pumice rafts sobre varios elementos y sistemas de un buque tipo, y dos dominios o zonas portuarias distintas.

Los impactos más significativos sobre los buques incluyeron: (1) efectos de carga estática vertical sobre la estabilidad de las embarcaciones; (2) daños en superficies y equipamiento de cubierta; (3) el ingreso de la ceniza volcánica fina en espacios confinados; (4) daños en los sistemas de generación, distribución y almacenamiento de energía eléctrica del buque, en equipos electrónicos y en sistemas computarizados para la navegación y comunicación; (5) la pérdida de la visibilidad atmosférica o en el agua, la navegabilidad y el posicionamiento; (6) obturación y daños en sistemas con tomas de *agua de mar*; (7) daños en sistemas de transmisión y propulsión del buque; (8) obturación y daños en turbinas; y (9) la abrasión, corrosión y crecimientos algales acelerados en cascos y obra viva.

Los impactos más significativos sobre los puertos incluyeron: (1) interrupción de operatividades, por impactos en accesibilidades territoriales, servicios de infraestructura crítica, visibilidad atmosférica reducida, peligros para la salud de los operarios, tareas de limpieza, mantenimiento, remediación, etc.; (2) daños en maquinaria e infraestructura portuaria; (3) ingresos de pumice rafts en bahías portuarias; (4) englamamiento de pumice rafts; y (5) problemáticas de sedimentación y removilización de ceniza volcánica.

El análisis de los impactos de caída de ceniza volcánica, y peligros asociados a la presencia de ceniza en el agua, ha mostrado una relación directa entre distintas medidas de intensidad del peligro (MIP) y los resultantes grados de severidad del impacto (GSI). Con el objetivo de modelar los impactos provocados por estos fenómenos sobre puertos y embarcaciones, se definieron cuatro “niveles” ordinales para categorizar los impactos observados, con GSI crecientes, correspondientes a: un nivel 0, en caso de ausencia de daños físicos o interrupción; un nivel 1, en casos de requerimiento de limpieza; un nivel 2, en casos de requerir reparaciones; y un nivel 3, en casos de destrucción total (requiriendo el reemplazo del elemento, o en caso de que la reparación sea económicamente inviable) o la pérdida terminante de funcionamiento y abandono.

De esta misma manera pudieron también definirse umbrales específicos de MIP para cada nivel de impacto, según espesores de caída o abundancia relativa de ceniza volcánica en el agua.

Esto permitió establecer distintos *estados de daño y disrupción* (EDD) y la construcción de una nueva Escala de Impactos (EI), que modela los efectos de la ceniza volcánica en los buques y en los puertos, basada en las Escalas de Daño y Disrupción propuestas por Wilson et al. (2014a) para impactos en siete sistemas de infraestructura crítica por cuatro peligros volcánicos distintos, incluidas las caídas piroclásticas. Este modelo temprano representa la primera EI para el transporte naval apoyada en bases empíricas de decenas de sitios portuarios y centenares de buques afectados por cuatro caídas piroclásticas significativas.

Estos modelos representan un recurso extremadamente valioso no solo para describir, organizar y condensar los impactos que han causado las caídas piroclásticas sobre los distintos elementos, sistemas y dominios que componen una red de transporte naval (*post-event impact assessment, Post-EIA*), sino también para prever las posibles consecuencias de futuros eventos volcánicos (*pre-event impact assessment, Pre-EIA*). Esta capacidad predictiva de las EI representa un recurso vital para la evaluación del riesgo volcánico y la planificación de estrategias de respuesta a la emergencia por caídas piroclásticas.

La investigación de los casos de estudio también ha permitido identificar que, tanto la removilización fluvial de los depósitos de tefra, como los deslizamientos subácueos y las olas tipo tsunami asociadas también pueden afectar la actividad naval. Estos procesos son poco frecuentes y de largo término, por lo que han requerido de un tratamiento separado. Entre los impactos más significativos se destacan: (1) problemáticas de sedimentación, pérdida de calado y removilización en vías fluviales, lacustres y bahías portuarias; (2) inundaciones y destrucción de infraestructura a causa de eventos hidro-geomórficos en cuencas fluvio-lacustres; (3) obturación y daños en sistemas con tomas de *agua de mar* a causa de *pumice rafts* regenerados a partir de eventos de removilización fluvial de tefra; y (4) daños en infraestructura costera a causa de deslizamientos subácueos y olas tipo tsunami asociadas.

Por otra parte también se evaluó la efectividad y eficacia de distintas metodologías adoptadas para la prevención, mitigación y remediación de impactos, que incluyeron: (1) la restricción de la navegación y el asilo de los buques; (2) diversas medidas de prevención de obturación de sistemas con tomas de agua de mar de los buques; (3) el despeje de ceniza volcánica de los buques; (4) el despeje de ceniza volcánica de los puertos; y (5) la contención de ingresos de pumice rafts en bahías portuarias y otros sitios críticos.

En el **Capítulo 4** se exploraron posibles vías de transferencia de aprendizajes a los sectores náutico y del manejo de la emergencia. Esto se consiguió a partir de una serie de recursos gráficos disponibles tipo *posters*, destinados originalmente para asesorar el resguardo de los sistemas de infraestructura crítica de Nueva Zelanda, y luego internacionalizados por la comisión *Cities and Volcanoes Commission's Volcanic Ash Impacts Working Group* a través del *U.S. Geological Survey*.

En primera instancia, se conceptualizó una versión preliminar de afiche que condensara los contenidos elaborados en los capítulos anteriores, para asesorar a operarios de puertos y embarcaciones en caso de futuras caídas piroclásticas. Mediante el consenso de los posibles futuros usuarios, obtenido a partir de pequeños ensayos de testeo, consistentes en una segunda ronda de entrevistas de investigación semi-estructuradas y dirigidas con un subgrupo de 17 autoridades, operarios y tomadores de decisiones de 12 organismos diferentes; el asesoramiento técnico brindado por 3 profesionales expertos en ciencias náuticas, ingeniería marítima y mecánica naval; y la revisión por parte de 2 científicos expertos en riesgo volcánico, se elaboró el afiche “Ceniza volcánica: avisos para el sector náutico (versión 1, junio de 2023)”.

Este nuevo dispositivo de transferencia condensa información referida a: (1) los distintos fenómenos asociados a la caída piroclástica primaria con capacidad de afectar el transporte naval; (2) los posibles impactos de la ceniza volcánica sobre los buques y los puertos; (3) acciones recomendadas para la preparación; (4) acciones recomendadas para la respuesta durante, y una vez finalizada, la caída piroclástica; y (5) el acceso a fuentes de aviso y material complementario. El afiche constituye una valiosa herramienta, única en su tipo, para la reducción del riesgo de desastres en el ámbito náutico ante eventos de caída piroclástica.

El mismo ha sido transferido eficazmente a numerosas instituciones, organizaciones y entidades privadas de vinculadas al transporte naval de Patagonia andina.

Este trabajo de investigación pone de relieve la imperante necesidad de profundizar en el entendimiento del riesgo volcánico por caídas piroclásticas y otros peligros asociados para el transporte naval. Los resultados obtenidos proporcionan una perspectiva detallada respecto de los desafíos afrontados por las autoridades y comunidades costeras de Patagonia ante eventos de caída piroclástica, poniendo a disposición una serie de nuevos recursos destinados a la reducción del riesgo de desastres y a la construcción de la resiliencia entre las poblaciones costeras de Patagonia andina y regiones de características similares.

5.2 Agradecimientos

Con muchísima estima y gratitud, quisiera reconocer a todas las personas y entidades cuya colaboración y apoyo fueron esenciales para la culminación de esta tesis doctoral. A través de sus contribuciones, cada uno ha dejado una huella más que significativa en este logro colectivo.

Quisiera destacar principalmente a mis directores, Gustavo y Débora, por su tiempo, dedicación, paciencia, consejos y enseñanzas. Sus experiencias en la materia y su constante apoyo han sido cruciales para la realización de este trabajo. Y a mi codirector de tesis doctoral, Tom.

A todos y cada uno de los integrantes del Grupo de Estudios Ambientales GEA (IPATEC, CONICET/UNCO), por compartir conmigo estos años de trabajo y aprendizaje conjunto. Particularmente, a Vale por todos sus meticulosos aportes y consejos. Y a todos mis compañeros de oficina, a los que estuvieron, los que están cerca y los que están lejos, por el tiempo que se tomaron para discutir mi trabajo y el suyo, por compartir el espacio, sus ideas, consejos, preocupaciones, campañas, mate y tarta de ricota. Y al Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC) y a la Universidad Nacional del Comahue (UNCO), por recibirme estos años en Bariloche.

A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (FCEN, UBA), por proporcionar un entorno académico excepcional y por el respaldo constante durante mi carrera doctoral. A Vanesa Litvak, por aceptar ser mi consejera de estudios en la FCEN, y por todas sus recomendaciones y asesoramientos que facilitaron tanto mi paso por la facultad. A Corina Risso y los becarios de la oficina 11a, por recibirme tan cálidamente durante mi estadía en la FCEN y luego continuar asesorándome a la distancia. Por esto último quisiera también agradecer a los integrantes de la Subcomisión de Doctorado y de la Secretaría del Departamento de Geología de la FCEN.

A Carol Stewart, por sus amables consejos, ideas y contribuciones. Y a Fer Baranzini, por su entusiasmo con mis ideas y todo su asesoramiento en cuestiones navales.

A mi familia, por su constante apoyo y aliento a pesar de la distancia.

A todas mis amistades de Bariloche y Burzaco. Especialmente a los que me acompañaron estos años de carrera, Cari, Belén, Dani, Romi, el Gordito, Juli, Tomi, Franco, Fuchi, Marie, Tito, Seba, Lula, Fer, Ana, a las visitas que pasaron por mi casa, a los primos, mis vecinos, los Palotinos, los Monte, los de Melquisedec, los Huinca y todos los que de alguna manera u otra contribuyeron con esto. Gracias por compartir su interés en mi trabajo, sus consejos, su colaboración con mis logísticas de campo, cursos y congresos, por los anticoagulantes, asados y campamentos.

Gran parte de esta tesis doctoral se construyó sobre la base de numerosas entrevistas de investigación. Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todos los entrevistados que generosamente dedicaron su valioso tiempo, conocimientos y entusiasmo a este estudio. Especialmente, deseo destacar a aquellos cuya colaboración fue fundamental, proporcionando una cantidad invaluable de información, ofreciendo visitas guiadas, facilitando tantos contactos

adicionales y permaneciendo en comunicación a la distancia. Agradezco especialmente a Juliana Daruich, Daniela Cerio, Agustina Abraham, Martín Pereira, Roxana Cerda, Carlos Tavalla, Beatriz Marottoli, Itatí Catalán, Gustavo Calquín, Marcos Arretche, así como a las empresas Turisur SRL, Naviera Lácar & Nonthué, Catamarán José Julián y Safari Lacustre, al Club Náutico de Bariloche, a Protección Civil Bariloche y Villa La Angostura, y a Prefectura Naval de Villa La Angostura.

Finalmente, un profundo agradecimiento los distinguidos Dres. Alberto Caselli, Julie Morin y Patricia Sruoga, quienes han tenido la amabilidad de actuar como jurados de esta tesis doctoral. Sus valiosas observaciones y sugerencias han contribuido de manera sustancial a la calidad y rigor académico de este trabajo de investigación.

A todos ustedes, ¡muchas gracias!

5.3 Referencias

- Alexander, D. (1989). Urban landslides. *Progress in Physical Geography*, 13: 157-191.
- Alexander, D. (2007). Making research on geological hazards relevant to stakeholders' needs. *Quaternary International*, 171: 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.01.006>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0428-x>
- Aliperti, G., Nagai, H. & Cruz, A. M. (2020). Communicating risk to tourists: A mental models approach to identifying gaps and misperceptions. *Tourism Management Perspectives*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2019.100615>
- Allard, P., Aiuppa, A., Loyer, H., Carrot, F., Gaudry, A., Pinte, G., Michel, A. & Dongarra, G. (2000). Acid gas and metal emission rates during long-lived basalt degassing at Stromboli volcano. *Geophysical Research Letters*, 27(8): 1207-1210. <https://doi.org/10.1029/1999GL008413>
- Alloway, B. V., Pearce, N. J. G., Villaros, G. & Outes, V. (2015). Multiple melt bodies fed the AD 2011 eruption of Puyehue-Cordón Caulle, Chile. *Scientific Reports*, 5(1): 1-8. <https://doi.org/10.1038/srep175894>
- Alloway, B., Pearce, N., Villarosa, G., Jara, I., De Pol-Holz, R. & Outes, V. (2017). An 18,000 year-long eruptive record from Volcán Chaitén, northwestern Patagonia: Paleoenvironmental and hazard-assessment implications. *Quaternary Science Reviews*, 168: 151-181. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.05.011>
- Amdal, J. R. & Swigart, S. L. (2010). Resilient transportation systems in a post-disaster environment: A case study of opportunities realized and missed in New Orleans and the Louisiana Coastal Region (No. 10-01). Gulf Coast Research Center for Evacuation and Transportation Resiliency. https://scholarworks.uno.edu/unoti_pubs/5
- Amigo, A., Silva, C., Orozco, G., Bertín, D. & Lara, L. (2012). La crisis eruptiva del volcán Hudson durante Octubre-Noviembre 2011. XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta.
- Amigo, A., Lara, L. E. & Smith, V. C. (2013). Holocene record of large explosive eruptions from Chaiten and Michinmahuida volcanoes, Chile. *Andean Geology*, 40(2): 227-248. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a03>
- Anselmi, F., Valot, N. & Spinelli, G. (2012). Diagnosis and Proposals for productive diversification, Los Lagos Department. CLER, local Rural Emergency Committee, Los Lagos Department.
- Armienta, M. A., De la Cruz-Renya, S., Morton, O., Cruz, O. & Ceniceros, N. (2002). Chemical variations of tephra-fall deposit leachates for three eruptions from Popocatepetl volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113: 61-80. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00251-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00251-7)
- Atkin, R. (1990). *Pillar of Fire: Dunkirk 1940*. London: Sidgwick & Jackson.

- Avdievitch, N. & Coe, J. (2022). Submarine landslide susceptibility mapping in recently deglaciated terrain, Glacier Bay, Alaska. *Frontiers in Earth Science*, 10: 821188. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.821188>
- Ayris, P. M. & Delmelle, P. (2012). The immediate environmental effects of tephra emission. *Bulletin of Volcanology*, 74(9): 1905-1936. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0654-5>
- Baker, E. J. (1991). Hurricane evacuation behavior. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 9(2): 287-310. <https://doi.org/10.1177/028072709100900210>
- Bakhshian, E., & Martinez-Pastor, B. (2023). Evaluating human behavior during a disaster evacuation process: A literature review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.04.002>
- Bandieri, S. (2019). *Historia de la Patagonia*, Tercera Edición. Sudamericana.
- Barberi, F., Corrado, G., Innocenti, F. & Luongo, G. (1984). Phlegraean Fields 1982-1984: Brief chronicle of a volcano emergency in a densely populated area. *Bulletin of Volcanology*, 47(2): 175-185. <https://doi.org/10.1007/BF01961547>
- Bardet, J., Synolakis, C., Davies, H., Imamura, F. & Okal, E. (2003). Lands-lide Tsunamis: Recent Findings and Research Directions. *Pure and Applied Geophysics*, 160(10): 1793-1809. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2406-0>
- Barnard, S. (2010). The vulnerability of New Zealand lifelines infrastructure to ashfall (Doctoral Thesis). University of Canterbury, Christchurch. <http://dx.doi.org/10.26021/8108>
- Baxter, P. J., Bonadonna, C., Dupree, R., Hards, V., Kohn, S., Murphy, M. D., Nichols, A., Nicholson, R. A., Norton, G., Searl, A., Sparks, R. S. & Vickers, B. P. (1999). Cristobalite in volcanic ash of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, British West Indies. *Science*, 283: 1142-1145.
- Baxter, P. J., Boyle, R., Cole, P., Neri, A., Spence, R. J. S. & Zuccaro, G. (2005). The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills, Montserrat. *Bulletin of Volcanology*, 67: 292–313. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0365-7>
- Beaud, S. (2018). L'usage de l'entretien en sciences sociales. Plaidoyer pour l'entretien ethnographique'. *Politix*, 9(35): 226-257.
- Beckett, F., Rossi, E., Devenish, B., Witham, C. & Bonadonna, C. (2022). Modelling the size distribution of aggregated volcanic ash and implications for operational atmospheric dispersion modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(5): 3409-3431. <https://doi.org/10.5194/acp-22-3409-2022>
- Beigt, D., Villarosa, G., Gómez, E. A., et al. (2016). Subaqueous landslides at the distal basin of Lago Nahuel Huapi (Argentina): Towards a tsunami hazard evaluation in Northern Patagonian lakes. *Geomorphology*, 268, 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.004>
- Beigt, D., Villarosa, G., Gómez, E. A. & Manzoni, C. (2016). Subaqueous landslides at the distal basin of Lago Nahuel Huapi (Argentina): Towards a tsunami hazard evaluation in Northern

- Patagonian lakes. *Geomorphology*, 268: 197–206.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.004>
- Beigt, D., Villarosa, G., De Luca, L., Barbosa, A., Gómez, E. A. & Raniolo, L. A. (2023). Coastal instability associated with gravitational processes in the large Patagonian lakes: A study of recent events. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 80(2): 280-299.
- Belenky, V. L., Spyrou, K. J., van Walree, F., Neves, M. A. S. & Umeda, N. editors (2019). *Contemporary Ideas on Ship Stability: Risk of Capsizing*. Volume 119. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00516-0>
- Bennet, K. (2002). Interviews and focus groups. In: Shumer-Smith, P. (Ed.). *Doing Cultural Geography*. Sage.
- Berz, G., Kron, W., Loster, T., Rauch, E., Schimetschek, J., Schmieder, J., Siebert, A., Smolka, A. & Wirtz, A. (2001). World map of natural hazards – A global view of the distribution and intensity of significant exposures. *Natural Hazards*, 23(2): 443-465.
<http://doi.org/10.1023/A:1011193724026>
- Best, J. L. (1992). Sedimentology and event timing of a catastrophic volcanoclastic mass flow, Volcan Hudson, Southern Chile. *Bulletin of Volcanology*, 54(4): 299-318.
<https://doi.org/10.1007/BF00301484>
- Bianchi, E., Villalba, R., Viale, M., Couvreur, F. & Marticorena, R. (2016). New precipitation and temperature grids for northern Patagonia: Advances in relation to global climate grids. *Journal of Meteorological Research*, 30: 38–52. <https://doi.org/10.1007/s13351-015-5058-y>
- Biass, S., Reyes Hardy, M. P., Gregg, C., Maio, L., Dominguez, L., Frischknecht, C., Bonadonna, C. & Pérez, N. (2024). The spatiotemporal evolution of compound impacts from lava flow and tephra fallout on buildings: lessons from the 2021 Tajogaite eruption (La Palma, Spain). *Bulletin of Volcanology*, 86(10): 24. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01700-w>
- Biedma, J. M. (1997). *Crónica histórica del lago Nahuel Huapi*, Tercera Edición. Ediciones Caleuche.
- Bitschene, P. R., & Fernández, M. I. (1995). Volcanology and petrology of fallout ashes from the August 1991 eruption of the Hudson Volcano (Patagonian Andes). In: *The August 1991 eruption of the Hudson Volcano (Patagonian Andes): a thousand days after*. Göttingen: Cuvillier.
- Blake, D. (2016). *Impacts of volcanic ash on surface transportation networks : considerations for Auckland City, New Zealand* (Doctoral Thesis). University of Canterbury, Christchurch.
<http://dx.doi.org/10.26021/7058>
- Blake, D., Wilson, T. & Gomez, C. (2016). Road marking coverage by volcanic ash: an experimental approach. *Environmental Earth Sciences*, 75(20). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6154-8>
- Blake, D. M., Wilson, T. M., Cole, J., Deligne, N. & Lindsay, J. (2017a). Impact of Volcanic Ash on Road and Airfield Surface Skid Resistance. *Sustainability*, 9(8): 1389.
<https://doi.org/10.3390/su9081389>

- Blake, D., Deligne, N., Wilson, T., & Wilson, G. (2017b). Improving volcanic ash fragility functions through laboratory studies: example of surface transportation networks. *Journal of Applied Volcanology*, 6(1): 16. <https://doi.org/10.1186/s13617-017-0066-5>
- Blake, D. M., Wilson, T. M. & Stewart, C. (2018). Visibility in airborne volcanic ash: considerations for surface transportation using a laboratory-based method. *Natural Hazards*, 92(1): 381–413. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3205-3>
- Blong, R. & McKee, C. (1995). The Rabaul eruption 1994 - destruction of a town. Natural Hazards Research Centre, Macquarie University.
- Blong, R. J. (1984). *Volcanic hazards: a sourcebook on the effects of eruptions*. Academic Press, Australia.
- Blong, R. J. (2003a). A Review of Damage Intensity Scales. *Natural Hazards*, 29: 57-76.
- Blong, R. (2003b). A new damage index. *Natural Hazards*, 30(1): 1-23. <https://doi.org/10.1023/A:1025018822429>
- Blong, R. (2003c). Building damage in Rabaul, Papua New Guinea, 1994. *Bulletin of Volcanology*, 65: 43-54. <https://doi.org/10.1007/s00445-002-0238-x>
- Bolin, B. & Kurtz, L. C. (2018). Race, class, ethnicity, and disaster vulnerability. In: Rodríguez, H., Quarantelli, E. L. & Dynes, R. R. (Eds.). *Handbook of Disaster Research*. Springer.
- Bonadonna, C. (2006). Probabilistic modelling of tephra dispersion. In: Mader, H. M., Coles, S. G., Connor, C. B., Connor, L. J. (Eds.). *Statistics in Volcanology*, Special Publication of IAVCEI. Geological Society of London, London.
- Bonadonna, C., Pistolesi, M., Cioni, Raffaello, Degruyter, W., Elissondo, M. & Baumann, Valérie. (2015a). Dynamics of wind-affected volcanic plumes: The example of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120. <https://doi.org/10.1002/2014JB011478>
- Bonadonna, C., Costa, A., Folch, A. & Koyaguchi, T. (2015b). Tephra Dispersal and Sedimentation. In H. Sigurdsson (Ed.). *The Encyclopedia of Volcanoes*, Second Edition. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00033-X>
- Bourque, L. B., Siegel, J. M., Kano, M., et al. (2006). Morbidity and mortality associated with disasters. In: Rodríguez, H., Quarantelli, E. L. & Dynes, R. R. (Eds.). *Handbook of Disaster Research*. New York: Springer.
- Branch, A. E. & Robarts, M. (2014). *Branch's elements of shipping*. Routledge.
- Branney, M. J. & Gilbert, J. S. (1995). Ice-melt collapse pits and associated features in the 1991 lahar deposits of Volcán Hudson, Chile: criteria to distinguish eruption-induced glacier melt. *Bulletin of Volcanology*, 57(5): 293-302. <https://doi.org/10.1007/s004450050095>

- Brothers, D. S., Haeussler, P. J., Liberty, L., Finlayson, D., Geist, E., Labay, K. & Byerly, M. (2016). A submarine landslide source for the devastating 1964 Chenega tsunami, southern Alaska. *Earth and Planetary Science Letters*, 438: 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.01.008>
- Brown, R., Bonadonna, C. & Durant, A. (2012). A review of volcanic ash aggregation. *Physics and Chemistry of the Earth*, 45-46: 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.11.001>
- Burns, M. G. (2018). *Port management and operations*. CRC press.
- Burns-Kokkinaki, M. (2004). The significance of navigation during prehistory. *European Anthropological Association's Annual Conference*, Greece.
- Cande, S. C., Leslie, R. B., Parra, J. C. & Hobart, M. (1987). Interaction between the Chile Ridge and Chile Trench: geophysical and geothermal evidence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B1): 495-520. <https://doi.org/10.1029/JB092iB01p00495>
- Carey, S. & Bursik, M. (2015). Volcanic Plumes. In: Sigurdsson, H. (Ed.). *The Encyclopedia of Volcanoes*, Second Edition. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00032-8>
- Carlton, J. (2018). *Marine propellers and propulsion*. Butterworth-Heinemann.
- Carn, S. A., Pallister, J. S., Lara, L., Ewert, J. W., Watt, S., Prata, A. J., Thomas, R. J. & Villarosa, G. (2009). The unexpected awakening of Chaitén volcano, Chile. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 90(24): 205-206. <https://doi.org/205-206.10.1029/2009EO240001>
- Carroll, J. J. & Parco, S. A. (1966). *Social organization in a crisis situation: The Taal disaster*. Philippine Sociological Society.
- Casadevall, T. J. (1994). *Volcanic ash and aviation safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*. US Geological Survey Bulletin, Seattle, Washington.
- Cashman, K. V., Sturtevant, B., Papale, P. & Navon, O. (2000). Magmatic fragmentation. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H. & Stix, J. (Eds.). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.
- Castro, J. M. & Dingwell, D. B. (2009). Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile. *Nature* 461(7265): 780. <https://doi.org/780.10.1038/nature08458>
- Castro, J. M., Schipper, C. I., Mueller, S. P., Militzer, A. S., Amigo, A., Parejas, C. S. & Jacob, D. (2013). Storage and eruption of near-liquidus rhyolite magma at Cordón Caulle, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 75(4): 702. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0702-9>
- Castruccio, A., Clavero, J., Segura, A., Samaniego, P., Roche, O., Le Pennec, J-L. & Droguett, B. (2016). Eruptive parameters and dynamics of the April 2015 sub-Plinian eruptions of Calbuco volcano (southern Chile). *Bulletin of Volcanology*, 78: 62. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1058-8>

- Catto, J. L. & Dowdy, A. (2021) Understanding compound hazards from a weather system perspective. *Weather and Climate Extremes*, 32(9): 100313. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100313>
- Cembrano, J., Hervé, F. & Lavenue, A. (1996). The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 259(1-3): 55-66.
- Chakraborty, J., Tobin, G. A. & Montz, B. E. (2005). Population evacuation: assessing spatial variability in geophysical risk and social vulnerability to natural hazards. *Natural Hazards Review*, 6(1): 23-33. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2005\)6:1\(23\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2005)6:1(23))
- Chapron, E., Ariztegui, D., Mulsow, S., Villarosa, G., Pino, M., Outes, V., Juvignié, E. & Crivelli, E. (2006). Impact of the 1960 major subduction earthquake in Northern Patagonia (Chile, Argentina). *Quaternary International*, 158(1): 58-71. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.017>
- Charmaz, K. (2000). Grounded theory: Objectivist and constructivist methods. In: Denzin, N. K. & Lincoln, Y. S. (Eds.). *Handbook of Qualitative Research*. Sage, Thousand Oaks, CA, 2, 509-535.
- Cimino, G. & Toscano, G. (1998). Dissolution of trace metals from lava ash: influence on the composition of rainwater in the Mount Etna volcanic area. *Environmental Pollution*, 99: 389-393. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)00004-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00004-9)
- Clavero, J. & Roa, H. (2004). Evolution of Villarrica Volcano, IAVCEI 2004. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No. 61.
- Clavero, J., Godoy, E., Arancibia, G., Rojas, C. & Moreno, H. (2008). Multiple Holocene sector collapses at Calbuco volcano, Southern Andes. IAVCEI General Assembly, Reykjavik, Iceland.
- Cloke, P., Cook, I., Crang, P., Goodwin, M., Painter, J. & Philo, C. (2004). Practising Human Geography, 148-159.
- Cohn, P., Carroll, M. & Kumagai, Y. (2006). Evacuation Behavior during Wildfires: Results of Three Case Studies. *Western Journal of Applied Forestry*, 21: 39-48. <https://doi.org/10.1093/wjaf/21.1.39>
- Collini, E., Osorio, M. S., Folch, A., Viramonte, J. G., Villarosa, G. & Salmuni, G. (2012). Volcanic ash forecast during the June 2011 Cordón Caulle eruption. *Natural Hazards*, 66: 389-412. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0492-y>
- Cook, R. J., Barron, J. C., Papendick, R. I. & Williams, G. J. (1981). Impact of Agriculture of the Mount St. Helens Eruptions. *Science*, 211: 16-22. <https://doi.org/10.1126/science.211.4477.16>
- Corbella, H. & Lara, L. E. (2008). Late cenozoic quaternary volcanism in Patagonia and Tierra del Fuego. *Developments in Quaternary Sciences*, 11: 95-119. [https://doi.org/10.1016/S1571-0866\(07\)10006-3](https://doi.org/10.1016/S1571-0866(07)10006-3)
- Córdoba, G., Villarosa, G., Sheridan, M. F., Viramonte, J. G., Beigt, D. & Salmuni, G. (2015). Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan

- modelling code during 2011 Cordón Caulle eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(4): 757–766. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-757-2015>
- CPC, Capitanía de Puertos de Chaitén (2021). Habilita la operación de la rampa de trasbordadores de Chaitén, Sector Toninas. Reso. N° 12.600/ 57. https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20211104/20211104152037/12600_57_02112_1_chaiten.pdf
- Cragg, P. (2022, February 1). Hazards to ships from volcanoes. The Nautical Institute, Institute News. <https://www.nautinst.org/resources-page/hazards-to-ships-from-volcanoes.html>
- Cragg, P. (2022). What are the volcanic hazards to ships: How can you risk assess if you don't know? Geological Society of America (GSA) Annual Meeting Abstracts. 2009. Portland, OR, USA.
- Craig, H., Wilson, T. M., Stewart, C., Outes, V., Villarosa, G. & Baxter, P. (2016). Impacts to agriculture and critical infrastructure in Argentina after ashfall from the 2011 eruption of the Cordón Caulle volcanic complex: an assessment of published damage and function thresholds. *Journal of Applied Volcanology*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13617-016-0046-1>
- Crang, M. (2002). Qualitative methods: The new orthodoxy? *Progress in Human Geography*, 26(5): 647-655. <https://doi.org/10.1191/0309132502ph392pr>
- Cronin, S. J., Hedley, M. J., Neall, V. E. & Smith, R. G. (1998). Agronomic impact of tephra fallout from the 1995 and 1996 Ruapehu Volcano eruptions, New Zealand. *Environmental Geology*, 34(1): 21-30. <https://doi.org/10.1007/s002540050253>
- Cronin, S. J., Neall, V. E., Lecointre, J. A., Hedley, M. J. & Loganathan, P. (2003). Environmental hazards of fluoride in volcanic ash: A case study from Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121: 271–291. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00465-1](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00465-1)
- Cronin, S., Petterson, M., Taylor, P., & Biliki, R. (2004). Maximising Multi-Stakeholder Participation in Government and Community Volcanic Hazard Management Programs: A Case Study from Savo, Solomon Islands. *Natural Hazards*, 33(1), 105-136. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000035021.09838.27>
- Cross, J. A. (2001). Megacities and small towns: Different perspectives on hazard vulnerability. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 3(2): 63-80. [https://doi.org/10.1016/S1464-2867\(01\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S1464-2867(01)00020-1)
- Crowder, B. (1995). The wonders of the weather. Bureau of Meteorology, Australian Government Publishing Service, Canberra. <http://www.bom.gov.au/info/cyclone/>
- Cutter, S. L. (2003). GI science, disasters, and emergency management. *Transactions in GIS*, 7(4): 439-446. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00157>
- D'Ercole, R. & Metzger, P. (2009). Territorial vulnerability: a new approach to risks in an urban environment. *European Journal of Geography*, 447: 87-96. <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.22022>

- Dash, N. & Gladwin, H. (2007). Evacuation decision making and behavioral responses: Individual and household. *Natural Hazards Review*, 8(3): 69-77. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2007\)8:3\(69\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2007)8:3(69))
- Davidson, R. A. (1997). An urban earthquake disaster risk index. John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Report No. 121.
- Davis, C. (2013). Wadi El Jarf site reveals oldest harbor, papyri ever found in Egypt. *Huffington Post*, Egypt State Information Service, Sorbonne University.
- Dawson, G. (1993). A comparison of research and practice: a practitioner's view. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 11(1): 55-62. <https://doi.org/10.1177/028072709301100104>
- De la Barrera, F., Reyes-Paecke, S. & Meza, L. (2011). Análisis del paisaje para la evaluación ecológica rápida de alternativas de relocalización de una ciudad devastada. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2): 181-194. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200004>
- Decreto 66/2017, Ministerio de Seguridad de la Nación (2017). <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/decreto-66-2017-271199>
- Defosse, S., Vinet, F., & Leone, F. (2017). Assessing vulnerability to flooding: Progress and limitations. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-268-7.50014-6>
- Del Gaudio, C., Aquino, I., Ricciardi, G. P., Ricco, C. & Scandone, R. (2010). Unrest episodes at Campi Flegrei: A reconstruction of vertical ground movements during 1905-2009. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 195(1): 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.05.014>
- Delgado, F., Pritchard, M., Lohman, R. & Naranjo, J. (2014). The 2011 Hudson volcano eruption (Southern Andes, Chile): Pre-eruptive inflation and hotspots observed with InSAR and thermal imagery. *Bulletin of Volcanology*, 76(5). <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0815-9>
- Deligne, Natalia & Jenkins, Susanna & Meredith, Elinor & Williams, George & Leonard, Graham & Stewart, Carol & Wilson, Tom & Biass, Sebastien & Blake, Daniel & Blong, Russell & Bonadonna, Costanza & B., Rodrigo & Hayes, Josh & Johnston, David & Kennedy, Ben & Magill, Christina & Spence, Robin & Wallace, Kristi & Wardman, John & Zuccaro, Giulio. (2022). From anecdotes to quantification: advances in characterizing volcanic eruption impacts on the built environment. *Bulletin of Volcanology*, 84. <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01506-8>
- Delmelle, P., Gerin, P. & Oskarsson, N. (2000). Surface and bulk studies of leached and unleached volcanic ashes. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 81, F1311.
- Delmelle, P., Lambert, M., Dufrêne, Y., Gerin, P. & Óskarsson, N. (2007). Gas/aerosol-ash interaction in volcanic plumes: new insights from surface analysis of fine volcanic ash. *Earth and Planetary Science Letters*, 259(1-2): 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.04.052>
- Denzin, N. & Lincoln, Y. (2012). El campo de la investigación cualitativa. Manual de investigación cualitativa. Gedisa.

- Depari, C. & Lindell, M. (2023). "Moving or not?": Factors affecting a community's responses to environmental disruption. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 95(9): 103898. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103898>
- Dingwell, D. B., Lavallée, Y. & Kueppers, U. (2012). Volcanic ash: A primary agent in the Earth system. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 45(2012): 2-4. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.007>
- Donovan, A., Toyos, G., Amigo, A., Villarosa, G., Lafranco, G. & Rovere, E. (2023). Managing cross-border eruptions: Insights from recent crises in Chile and Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 435(7265): 107774. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107774>
- Drabek, T. E. (1995). Disaster responses within the tourist industry. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 13(1): 7-23. <https://doi.org/10.1177/028072709501300102>
- Dunn, K. (2000). Interviewing. In: Hay, I. (Ed.). *Qualitative Research Methods in Human Geography*, First Edition. Melbourne, VIC: Oxford University Press.
- Dunn, S., Fu, G., Wilkinson, S. & Dawson, R. (2013). Network theory for infrastructure systems modelling. *Proceedings of the ICE-Engineering Sustainability*, 166: 281–292.
- Duputel, Z., Rivera, L., Kanamori, H. & Hayes, G. (2012). W phase source inversion for moderate to large earthquakes (1990-2010). *Geophysical Journal International*, 189(2): 1125–1147. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2012.05419.x>
- Durand, M., Gordon, K., Johnston, D., Lorden, R., Poirot, T., Scott, J., Shephard, B., 2001. Impacts of, and responses to ashfall in Kagoshima from Sakurajima Volcano - lessons for New Zealand, Institute of Geological and Nuclear Sciences science report 2001/30, 53p
- Durant, A. J., Villarosa, G., Rose, W. I., Delmelle, P., Prata, A. J. & Viramonte, J. G. (2012). Long-range volcanic ash transport and fallout during the 2008 eruption of Chaitén volcano, Chile. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 45-46: 50-64. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.09.004>
- Elissondo, M., Baumann, V., Bonadonna, C., Pistolesi, M., Cioni, R., Bertagnini, A., Biass, S., Herrero, J. C. & Gonzalez, R. (2015). Chronology and impact of the 2011 Puyehue-Cordón Caulle eruption, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 3: 5383-5452. <https://doi.org/10.5194/nhessd-3-5383-2015>
- EM-DAT, The International Disaster Database (2023). <https://www.emdat.be/>
- Estrada, N. (2016). Effects of grain size distribution on the packing fraction and shear strength of frictionless disk packings. *Physical Review E* 94(6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.94.062903>
- Eyres, D. J. & Bruce, G. J. (2012). *Ship Construction*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-68324-6>
- Charlton, D., Kilburn, C. & Edwards, S. (2020). Volcanic unrest scenarios and impact assessment at Campi Flegrei caldera, Southern Italy. *Journal of Applied Volcanology*, 9(1): 1-26. <https://doi.org/10.1186/s13617-020-00097-x>

- Fearnley, C., Bird, D., Haynes, K., McGuire, B. & Jolly, G. (2018). Observing the Volcano World Volcano Crisis Communication: Volcano Crisis Communication. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44097-2>
- Few R, Barclay J (2011) Societal Impacts of Natural Hazards, a review of international research funding. UK Collaborative on Development Sciences, London. Available from: <http://www.ukcds.org.uk/resources/societal-impactsof-natural-hazards-a-review-of-international-research-funding>
- Folch, A., Jorba, O. & Viramonte, J. (2008). Volcanic ash forecast-application to the May 2008 Chaitén eruption. *Natural Hazards and Earth System Science* 8(4): 927-940. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-927-2008>
- Foster, H. D. (1976). Assessing disaster magnitude: a social science approach. *Professional Geographer*, 28(3): 241–247. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1976.00241.x>
- Fournier, T., Pritchard, M. & Riddick, S. (2010). Duration, magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from Latin America using InSAR and a global synthesis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(1): 1-29. <https://doi.org/10.1029/2009GC002558>
- Fuenzalida, R. & Espinosa, W. (1974). Hallazgo de una caldera volcánica en la provincia de Aisén. *Revista Geológica de Chile*, 1(1): 64-66.
- Futa, K. & Stern, C. R. (1988). Sr and Nd isotopic and trace element compositions of Quaternary volcanic centers of the southern Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 88(3-4): 253-262. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90082-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90082-9)
- Garreaud, R. (2009). The Andes Climate and Weather. *Advances in Geosciences*, 22: 3-11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>
- Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M. & Rojas, M. (2013). Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate*, 26: 215-230. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>
- Gerlach, D. C., Frey, F. A., Moreno-Roa, H. & López-Escobar, L. (1988). Recent volcanism in the Puyehue-Cordón Caulle region, Southern Andes, Chile (40,5° S): petrogenesis of evolved lavas. *Journal of Petrology*, 29(2): 333-382. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.2.333>
- Girardclos, S., Schmidt, O. T., Sturm, M., Ariztegui, D., Pugin, A. & Anselmetti, F. S. (2007). The 1996 AD delta collapse and large turbidite in Lake Brienz. *Marine Geology*, 241(1): 137-154. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.03.011>
- Gislason, S. R. & Oelkers, E. H. (2003). Mechanisms, rates, and consequences of basaltic glass dissolution: II. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of pH and temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(20): 3817-3822. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00176-5)
- Gladwin, H., & Peacock, W. G. (1997). Warning and evacuation: A night for hard houses. In: Peacock, W. G., Morrow, B. H. & Gladwin, H. (Eds.). *Hurricane Andrew - Ethnicity, Gender and the Sociology of Disasters*. Routledge.

- Glaser, B. G. & Strauss, A. L. (2017). *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. Routledge. Aldine de Gruyter, Hawthorne, NY, 271. <https://doi.org/10.4324/9780203793206>
- Godschalk, D. R. (2003). Urban hazard mitigation: creating resilient cities. *Natural Hazards Review*, 4(3): 136-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2003\)4:3\(136\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:3(136))
- Golding, D. & Kasperson, R. E. (1988). Emergency planning and nuclear power: looking to the next accident. *Land Use Policy*, 5(1): 19-36. [https://doi.org/10.1016/0264-8377\(88\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0264-8377(88)90004-X)
- González-Ferrán, O. (1995). *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar.
- Gordon, K. D., Cole, J. W., Rosenberg, M. D. & Johnston, D. M. (2005). Effects of Volcanic Ash on Computers and Electronic Equipment. *Natural Hazards*, 34(2): <https://doi.org/231-262.10.1007/s11069-004-1514-1>
- Gourgaud, A., Thouret, J-C. & Bourdier, J-L. (2000). Stratigraphy and textural characteristics of the 1982-1983 tephra of Galunggung volcano (Indonesia): implications for volcanic hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104(1): 169-186. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00205-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00205-5)
- Grossi, P. & Muir-Wood, R. (2006). *The 1906 San Francisco Earthquake and Fire: Perspectives on a Modern Super Cat*. Newark, CA: Risk Management Solutions, Inc.
- Guffanti, M., Mayberry, G.C., Casadevall, T.J. & Wunderman, R. (2009). Volcanic hazards to airports. *Natural Hazards*, 51: 287–302. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9254-2>
- Guffanti, M., Casadevall, T. J. & Budding, K. (2010). Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: A compilation of known incidents, 1953–2009. US Geological Survey Data Series 545, ver. 1.0.
- Gutiérrez, F., Gioncada, A., Ferran, O. G., Lahsen, A. & Mazzuoli, R. (2005). The Hudson Volcano and surrounding monogenetic centres (Chilean Patagonia): an example of volcanism associated with ridge–trench collision environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145(3-4): 207-233. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.01.014>
- GVP, Global Volcanism Program (2013) *Volcanoes of the World*, v. 4.8.2. Venzke E (ed.) Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>
- Hansell, A. L., Horwell, C. J. & Oppenheimer, C. (2006). The health hazards of volcanoes and geothermal areas. *Occupational and Environmental Medicine*, 63: 149-156. <https://doi.org/10.1136/oem.2005.022459>
- Harders, R., Kutterolf, S. , Hensen, C., Moerz, T. & Brueckmann, W. (2010). Tephra layers: A controlling factor on submarine translational sliding? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11(5): 1525-2027. <https://doi.org/10.1029/2009gc002844>
- Hayes, S. K., Montgomery, D. R. & Newhall, C. G. (2002). Fluvial sediment transport and deposition following the 1991 eruption of Mount Pinatubo. *Geomorphology*, 45(3-4): 211–224. [https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(01\)00155-6](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(01)00155-6)

- Hayes, J. L., Wilson, T. M. & Magill, C. (2015). Tephra fall clean-up in urban environments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 204: 359–377. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.014>
- Hayes, J., Fitzgerald, R., Wilson, T. M., Weir, A., Williams, J., Leonard, G. (2024). Linking hazard intensity to impact severity: mini review of vulnerability models for volcanic impact and risk assessment. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1278283>
- Haynes, K., Barclay, J. y Pidgeon, N. 2008. The issue of trust and its influence on risk communication during a volcanic crisis. *Bulletin of Volcanology* 70(5): 605–621. <http://doi.org/10.1007/s00445-007-0156-z>
- Haynes, K., Coates, L., Leigh, R., Handmer, J., Whittaker, J., Gissing, A., McAneney, J. & Opper, S. (2009). 'Shelter-in-place' vs. evacuation in flash floods. *Environmental Hazards*, 8(4): 291-303. <https://doi.org/10.3763/ehaz.2009.0022>
- Heckathorn, D. D. (1997). Respondent-driven sampling: a new approach to the study of hidden populations. *Social Problems*, 44(2): 174-199. <https://doi.org/10.2307/3096941>
- Heckathorn, D. D. (2002). Respondent-driven sampling II: deriving valid population estimates from chain-referral samples of hidden populations. *Social Problems*, 49(1): 11-34. <https://doi.org/10.1525/sp.2002.49.1.11>
- Heiken, G. & Wohletz, K. (1985). *Volcanic Ash*. University Presses of California, Chicago, Harvard & MI.
- Hellenic Maritime Museum (2013). Prehistoric and ancient age, Greece. <http://www.Hmmuseum.Gr>.
- Hickey-Vargas, R., Roa, H. M., Escobar, L. L. & Frey, F. A. (1989). Geochemical variations in Andean basaltic and silicic lavas from the Villarrica-Lanin volcanic chain (39.5° S): an evaluation of source heterogeneity, fractional crystallization and crustal assimilation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103(3): 361-386. <https://doi.org/10.1007/BF00402922>
- Hickey-Vargas, R., Abdollahi, M. J., Parada, M. A., López-Escobar, L. & Frey, F. A. (1995). Crustal xenoliths from Calbuco Volcano, Andean Southern Volcanic Zone: implications for crustal composition and magma-crust interaction. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(4): 331-344. <https://doi.org/10.1007/BF00286933>
- Higman, B., Shugar, D., Stark, C., Ekström, G., Koppes, M., Lynett, P., Dufresne, A., Haeussler, P., Geertsema, M., Gulick, S., Mattox, A., Venditti, J., Walton, M., McCall, N., Mckittrick, E., MacInnes, B., Bil-derback, E., Tang, H., Willis, M., Richmond, B., Reece, R., Larsen, C., Olson, B., Capra, J., Ayca, A., Bloom, C., Williams, H., Bonno, D., Weiss, R., Keen, A., Skanavis, V. y Loso, M. (2018). The 2015 landslide and tsunami in Taan Fiord, Alaska. *Scientific Reports*, 8(1): 12993. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30475-w>

- Hildreth, W. & Fierstein, J. (2012). The Novarupta-Katmai eruption of 1912: largest eruption of the twentieth century: centennial perspectives. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1791: 1-278.
- Holguín-Veras, J., Pérez, N., Ukkusuri, S., Wachtendorf, T. & Brown, B. (2007). Emergency logistics issues affecting the response to Katrina: a synthesis and preliminary suggestions for improvement. *Transportation Research Record*, 2022(1): 76-82. <https://doi.org/10.3141/2022-09>
- Holz, A. & Veblen, T. (2011). Variability in the Southern Annular Mode determines wildfire activity in Patagonia. *Geophysical Research Letters*, 38, 14710. <https://doi.org/10.1029/2011GL047674>
- Horwell, C. J. & Baxter, P. J. (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology*, 69: 1–24. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0052-y>
- Houghton, B. & Carey, R. J. (2015). Pyroclastic Fall Deposits. In H. Sigurdsson (Ed.). *The Encyclopedia of Volcanoes*, Second Edition. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00034-1>
- Houghton, B. F., Wilson, C. J. N. & Pyle, D. M. (2000). Pyroclastic fall deposits. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H. & Stix, J. (Eds.). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.
- Hughey, E. P. (2008). A longitudinal study: The impact of a comprehensive emergency management system on disaster response in the Commonwealth of the Bahamas. University of South Florida. <https://digital.lib.usf.edu/?e14.2743>
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2): 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hutcheson, G., & Longhurst, R. (2016). At least in person there would have been a cup of tea: Interviewing via Skype. *Area*, 49. <https://doi.org/10.1111/area.12306>
- ICSU (2008) A Science Plan for Integrated Research on Disaster Risk (IRD). International Council for Science, Paris. Available from: <http://www.icsu.org/publications/reports-and-reviews/IRD-science-plan/ird-science-plan.pdf>
- Iglesias, V., Whitlock, C., Bianchi, M., Villarosa, G. & Outes, V. (2011). Holocene climate variability and environmental history at the Patagonian forest/steppe ecotone: Lago Mosquito (42°29'37.89"S, 71°24'14.57"W) and Laguna del Cóndor (42°20'47.22"S, 71°17'07.62"W). *The Holocene*, 22: 1297-1307. <https://doi.org/10.1177/0959683611427330>
- INDEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos, Argentina (2010). Censo 2010. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>
- INE, Instituto Nacional de Estadísticas (1992). Censo de Población y Vivienda, 1992. https://redatam-ine.ine.cl/redbin/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CENSO_1992&lang=esp
- INE, Instituto Nacional de Estadísticas (2002). Censo de Población y Vivienda, 2002. https://redatam-ine.ine.cl/redbin/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CENSO_2002&lang=esp

- INE, Instituto Nacional de Estadísticas (2017). Censo de Población y Vivienda, 2017. https://redatam-ine.ine.cl/redbin/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CENSO_2017&lang=esp
- IRDR, Integrated Research on Disaster Risk (2014). Peril Classification and Hazard Glossary. Beijing: Integrated Research on Disaster Risk, Beijing. IRDR DATA Publication No. 1. https://www.irdrinternational.org/knowledge_pool/publications/173
- Jenkins, S., Magill, C., McAneney, J. & Blong, R. (2012). Regional ash fall hazard I: a probabilistic assessment methodology. *Bulletin of Volcanology*, 74 (7): 1699-1712. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0627-8>
- Jenkins, S., Spence, R., Fonseca, J., Solidum, R. & Wilson, T. (2014). Volcanic risk assessment: Quantifying physical vulnerability in the built environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 276: 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.03.002>
- Jenkins, S. F., Wilson, T. M., Magill, C., Miller, V., Stewart, C., Blong, R., Marzocchi, W., Boulton, M., Bonadonna, C. & Costa, A. (2015). Volcanic ash fall hazard and risk. In: Loughlin, S.C., Sparks, R. S. J., Brown, S. K., Jenkins S. F. & Vye-Brown, C. (Eds.). *Global Volcanic Hazards and Risk*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jenkins, S., Biass, S., Williams, G., Hayes, J., Tennant, E., Yang, Q., Burgos, V., Meredith, E., Lerner, G., Syarifuddin, M. & Verolino, A. (2022). Evaluating and ranking Southeast Asia's exposure to explosive volcanic hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22: 1233-1265. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1233-2022>
- Johnston, D. M. (1997) Physical and social impacts of past and future volcanic eruptions in New Zealand (Doctoral Thesis). University of Massey, New Zealand. <https://mro.massey.ac.nz/items/74dd7a9f-3024-4270-8fec-867c40444706>
- Johnston, D. M., Bebbington, M., Lai, C-D., Houghton, B. F. & Paton, D. (1999). Volcanic hazard perceptions: comparative shifts in knowledge and risk. *Disaster Prevention and Management* 8(2): 118-126. <http://doi.org/10.1108/09653569910266166>
- Johnston, D. M., Houghton, B. F., Neall, V. E., Ronan, K. R. & Paton, D. (2000). Impacts of the 1945 and 1995-1996 Ruapehu eruptions, New Zealand: An example of increasing societal vulnerability. *Geological Society of America Bulletin*, 112(5): 720–726. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<720:IOTARE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<720:IOTARE>2.0.CO;2)
- Johnston, D., Scott, B. J., Houghton, B., Paton, D., Dowrick, D. J., Villamor, P. & Savage, J. (2002). Social and economic consequences of historic caldera unrest at the Taupo volcano, New Zealand and the management of future episodes of unrest. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 35(4): 215–230. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.35.4.215-230>
- Jones, M. T., Sparks, R. S. J. & Vades, P. J. (2007). The climatic impact of supervolcanic ash blankets. *Climate Dynamics*, 29(6): 553-564. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0248-7>

- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandini, L., Iredell, M., Saha, S. & White, G. (1996). The NCEP/NCAR 40-years reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77: 437-472. <https://doi.org/10.4324/9781315793245-16>
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82(20): 2981–2987. <https://doi.org/10.1029/jb082i020p02981>
- Kataoka, K. (2005). Distal fluvio-lacustrine volcanoclastic resedimentation in response to an explosive silicic eruption: The Pliocene Mushono tephra bed, central Japan. *Geological Society of America Bulletin*, 117. <https://doi.org/10.1130/B25379.1>
- Katili, J. A. & Sudrajat, A. (1984). Galunggung: the 1982-1983 eruption. *Volcanological Survey of Indonesia*.
- Kear, R. F. (1988). Tarawera: The volcanic eruption of 10 June 1886 A.D. Physics Department, University of Auckland, New Zealand.
- Keeney, L. D. (2021). *The Lives They Saved: The Untold Story of Medics, Mariners and the Incredible Boatlift that Evacuated Nearly 300,000 People on 9/11*. Rowman & Littlefield.
- Kilian, R. & López-Escobar, L. (1991). Petrology of the southern South Andean volcanic zone (41°–46° S) with emphasis on the Michinmahuida-Chaitén complex (43° S). *Symposium on Latin-American Geosciences, München*.
- Kilian, R., Hohner, M., Biester, H., Wallrabe-Adams, H. J. & Stern, C. R. (2003). Holocene peat and lake sediment tephra record from the southernmost Chilean Andes (53–55° S). *Revista Geológica de Chile*, 30(1): 23–37. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082003000100002>
- King, D. (2008). Reducing hazard vulnerability through local government engagement and action. *Natural Hazards*, 47(3): 497–508. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9235-5>
- Kinsley, S. (2013). Beyond the screen: methods for investigating geographies of life 'online'. *Geography Compass*, 7/8: 540–55. <https://doi.org/10.1111/gec3.12062>
- Kinsley, S. (2014). The matter of 'virtual' geographies. *Progress in Human Geography*, 38: 364–84. <https://doi.org/10.1177/0309132513506270>
- Kitchen, R. & Tate, N. J. (2000). *Conducting Research into Human Geography*. Edinburgh Gate: Pearson.
- Kitzberger, T., Veblen, T. T. & Villalba, R. (1997). Climatic influences on fire regimes along a rain forest-to-xeric woodland gradient in northern Patagonia, Argentina. *Journal of Biogeography*, 24(1): 35–47. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.1997.tb00048.x>
- Klyachko, Mark. (1996). Disaster Magnitude Scale "Dimak" and Disaster Scenarios for Analysis of Calamities. *Prehospital and Disaster Medicine*, 10(S2): S35–S36. <https://doi.org/10.1017/S1049023X00500922>
- Köhler, T., Rumyantseva, M. & Welch, C. (2023). Qualitative Restudies: Research Designs for Retheorizing. *Organizational Research Methods*. <https://doi.org/10.1177/10944281231216323>

- Kolen, B. & Helsloot, I. (2014). Decision-making and evacuation planning for flood risk management in the Netherlands. *Disasters*, 38(3): 610-635. <https://doi.org/10.1111/disa.12059>
- Kratzmann, D. J., Carey, S., Scasso, R. & Naranjo, J. A. (2009). Compositional variations and magma mixing in the 1991 eruptions of Hudson volcano, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 71(4): 419-439. <https://doi.org/10.1007/s00445-008-0234-x>
- Kratzmann, D. J., Carey, S. N., Fero, J., Scasso, R. A. & Naranjo, J. A. (2010). Simulations of tephra dispersal from the 1991 explosive eruptions of Hudson volcano, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 190(3-4): 337-352. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.11.021>
- Kremer, K., Hilbe, M., Simpson, G., Decrouy, L., Wildi, W. & Girardclos, S. (2015). Reconstructing 4000 years of mass movement and tsunami history in a deep peri-Alpine lake (Lake Geneva, France-Switzerland). *Sedimentology* 62(5): 1305-1327. <https://doi.org/10.1111/sed.12190>
- Krinitzsky, E. L. (1993). Earthquake probability in engineering – Part 2: Earthquake recurrence and limitations of Gutenberg – Richter b-values for the engineering of critical structures. *Engineering Geology*, 36: 1–52.
- Kroll-Smith, J. & Drabek, T. (1988). Human System Response to Disaster: An inventory of sociological findings. *Contemporary Sociology*, 17: 513. <https://doi.org/10.2307/2072722>
- Kvale, S. (2008). *Las entrevistas en investigación cualitativa*. Madrid: Ediciones Morata.
- L'Heureux, J. S., Longva, O., Hansen, L. & Vanneste, M. (2014). The 1930 landslide in Orkdalsfjorden: Morphology and failure mechanism. In: Krastel, S., Behrmann J-H, Völker, D., Stipp, M., Berndt, C., Urgeles, R., Chaytor, J., Huhn, K., Strasser, M. & Harbitz, C.B. (eds.). *Submarine mass movements and their consequences*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00972-8_21
- Landauer, J., Kuhn, M., Nasato, D., Först, P. & Briesen, H. (2019). Particle shape matters - Using 3D printed particles to investigate fundamental particle and packing properties. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.051>
- Lara, L. E. (2009). The 2008 eruption of the Chaitén Volcano, Chile: a preliminary report. *Andean Geology*, 36(1): 125-129. <https://doi.org/10.4067/S0718-71062009000100009>
- Lara, L. E., Naranjo, J. A. & Moreno, H. (2004). Rhyodacitic fissure eruption in Southern Andes (Cordón Caulle; 40.5 S) after the 1960 (Mw: 9.5) Chilean earthquake: a structural interpretation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 138(1-2): 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.009>
- Lara, L. E., Moreno, H., Naranjo, J. A., Matthews, S. & Perez de Arce, C. (2006). Magmatic evolution of the Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex (40° S), Southern Andean Volcanic Zone: from shield to unusual rhyolitic fissure volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157: 343-366. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.04.010>

- Lara, L. E., Moreno, R., Amigo, A., Hoblitt, R. P. & Pierson, T. C. (2013). Late Holocene history of Chaiten volcano: new evidence for a 17th century eruption. *Andean Geology*, 40(2): 249-261. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a04>
- Latarche, M. (2021). *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04828-0>
- Lehmann, D. R., Gupta, S. & Steckel, J. H. (1998). *Marketing Research*. Addison-Wesley, Massachusetts.
- Leitner, S. J. & Harrison, R. (2001). The identification and classification of inland ports. University of Texas at Austin, Center for Transportation Research, Technical Report No. 0-4083-1.
- Leonard, R. (1985). Mass evacuation in disasters. *Journal of Emergency Medicine*, 2(4): 279-286. [https://doi.org/10.1016/0736-4679\(85\)90108-8](https://doi.org/10.1016/0736-4679(85)90108-8)
- Leone, F., Komorowski, J.-C., Gherardi, M. & Lalubie, G. (2019). Integrating spatial accessibility in the design of volcano evacuation plans in the French West Indies (Guadeloupe and Martinique). *Journal of Applied Volcanology*, 8(1): 1-22. <https://doi.org/10.1186/s13617-019-0089-1>
- Ley 18.398 (1969). Ley General de la Prefectura Naval Argentina. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-18398-46324/>
- Ley 20.094 (1973). Ley de la Navegación. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-20094-43550>
- Ley 22.351 (1980). Ley de los Parques Nacionales, Monumentos Naturales y Reservas Nacionales. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/16299/actualizacion>
- Ley 24.093 (1992). Ley de Actividades Portuarias. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-24093-492/actualizacion>
- Ley 27.287 (2016). Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27287-266631>
- Ley del Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil (2016). <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27287-266631>
- Lindell, M. K. & Perry, R. W. (1992). *Behavioral Foundations of Community Emergency Planning*. Hemisphere Publishing Corp.
- Lindell, M. K., Perry, R. & Prater, C. S. (2006). *Fundamentals of emergency management*. Emmitsburg, MD: Emergency Management Institute. <https://training.fema.gov/EMIWeb/edu/fem.asp>
- Linnerooth-Bayer, J., Scolobig, A., Ferlisi, S., Cascini, L. y Thompson, M (2015). Expert engagement in participatory processes: Translating stakeholder discourses into policy options. *Natural Hazards* 81: 69-88. <http://doi.org/10.1007/s11069-015-1805-8>

- Lirer, L., Pescatore, T., Booth, B. & Walker, G. P. (1973). Two plinian pumice-fall deposits from Somma-Vesuvius, Italy. *Geological Society of America Bulletin*, 84(3): 759-772. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1973\)84<759:TPPDFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84<759:TPPDFS>2.0.CO;2)
- Lolich, L. (1992). Tipos de asentamientos rurales y semirurales en la Zona Nahuel Huapi. (Inédito).
- Longhurst, R. (2016). Semi-structured interviews and focus groups. In: Clifford, N., Cope, M., Gillespie, T. & French, S. (Eds.). *Key methods in geography*, Third Edition, Vol. 3. Sage.
- Longo, M. L. (2019). How memory can reduce the vulnerability to disasters: The bradyseism of Pozzuoli in southern Italy. *AIMS Geosciences*, 5(3): 631-644. <https://doi.org/10.3934/geosci.2019.3.631>
- López-Escobar, L., Kilian, R., Kempton, P. D. & Tagiri, M. (1993). Petrography and geochemistry of Quaternary rocks from the Southern Volcanic Zone of the Andes between 41°30' and 46°00'S, Chile. *Andean Geology*, 20(1): 33-55. <https://doi.org/10.5027/andgeoV20n1-a04>
- López-Escobar, L., Cembrano, J. & Moreno, H. (1995a). Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37°-46° S). *Andean Geology*, 22(2): <https://doi.org/219-234>. [10.5027/andgeoV22n2-a06](https://doi.org/10.5027/andgeoV22n2-a06)
- López-Escobar, L., Parada, M. A., Hickey-Vargas, R., Frey, F. A., Kempton, P. D. & Moreno, H. (1995). Calbuco Volcano and minor eruptive centers distributed along the Liquiñe-Ofqui Fault Zone, Chile (41-42° S): contrasting origin of andesitic and basaltic magma in the Southern Volcanic Zone of the Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(4): 345-361. <https://doi.org/10.1007/s004100050047>
- Lowe, D. J. (2011). Tephrochronology and its application: a review. *Quaternary Geochronology*, 6: 107-153. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2010.08.003>
- Macedonio, G. & Costa, A. (2012). Rain effect on the load of tephra deposits. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 1-9. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1229-2012>
- Macedonio, G., Dobran, F. & Neri, A. (1994). Erosion processes in volcanic conduits and application to the AD 79 eruption of Vesuvius. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(1-2): 137-152. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90037-X)
- Madge, C. (2010). Internet mediated research. In: Clifford, N., French, S. & Valentine G. (Eds.). *Key methods in geography*. Sage.
- Major, J. J. & Lara, L. E. (2013) Overview of Chaitén volcano, and its 2008-2009 eruption. *Andean Geology*, 40(2): 196-215. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a01>
- Major, J. J., Bertin, D., Pierson, T. C., Amigo, Á., Iroumé, A., Ulloa, H. & Castro, J. (2016). Extraordinary sediment delivery and rapid geomorphic response following the 2008- 2009 eruption of Chaitén Volcano, Chile. *Water Resources Research*, 52(7): 5075–5094. <https://doi.org/10.1002/2015wr018250>

- Mandujano, F., Torrent, J., Reyes, S. & Medina, P. (2015). La erupción del volcán Chaitén: voyerismo, desconfianza, academia y estado. Consecuencias urbanas y sociales en la comunidad. *Universum*, (Talca) 30: 153-177. <https://doi.org/10.4067/S0718-23762015000200010>
- Manville, V., White, J., Houghton, B. & Wilson, C. (1998). The Saturation Behaviour of Pumice and Some Sedimentological Implications. *Sedimentary Geology*, 119: 5-16. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00057-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00057-8)
- Marrero, J. M., Garcia, A., Llinares, A., Rodríguez-Losada, J. A. & Ortiz, R. (2010). The Variable Scale Evacuation Model (VSEM): a new tool for simulating massive evacuation processes during volcanic crises. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(4): 747-760. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-747-2010>
- Martin, R. S., Watt, S. F. L., Pyle, D., Mather, T. A., Matthews, N. E., Georg, R. B., Day, J. A., Fairhead, T., Witt, M. L. I. & Quayle, B. M. (2009). Environmental effects of ashfall in Argentina from the 2008 Chaitén volcanic eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184(3-4): 462-472. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.04.010>
- Marzi, J. & Broglia, R. (2018). Hydrodynamic Tools in Ship Design. In: Papanikolaou, A. (Ed.). *A Holistic Approach to Ship Design*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02810-7_6
- Marzocchi, W. & Woo, G. (2007). Probabilistic eruption forecasting and the call for an evacuation. *Geophysical Research Letters*, 34(22). <https://doi.org/10.1029/2007GL03192>
- Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M. L. & Di Ruocco, A. (2012). Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. *Natural Hazards* 62(2): 551–573. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0092-x>
- Masson, D., Harbitz, C., Wynn, R., Pedersen, G. & Løvholt, F. (2006). Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1845): 2009-39. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1810>
- Matossian, B. (2012). Modelos de desarrollo, poblamiento y frontera: El caso del Parque Nacional Nahuel Huapi. *Estudios Sociales Contemporáneos*, N°5/6.
- Matyas, C., Srinivasan, S., Cahyanto, I., Thapa, B., Pennington-Gray, L. & Villegas, J. (2011). Risk perception and evacuation decisions of Florida tourists under hurricane threats: A stated preference analysis. *Natural Hazards*, 59(2): 871-890. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9801-0>
- McBean GA (2012) Integrating disaster risk reduction towards sustainable development. *Curr Opin Environ Sustain* 4:122–127
- McCalpin, J. P. (1996). *Paleoseismology*. International Geophysics Series, Academic Press, San Diego.

- McCann, M. W., Sauter, F. & Shah, H. C. (1980). Technical note of PGA – Intensity relationships with applications to damage estimation. *Bulletin Seismological Society of America*, 70(2): 631–637. <http://doi.org/10.1785/BSSA0700020631>
- McCool, S. F., Burchfield, J., Williams, D. R., et al. (2003). Wildfire and communities: A state of knowledge synthesis. Report prepared for USDA Forest Service, North Central Research and Experiment Station 39.
- McKee, C. O., Johnson, R. W., Lowenstein, P. L., Riley, S. J., Blong, R. J., De Saint Ours, P. & Talai, B. (1985). Rabaul caldera, Papua New Guinea: volcanic hazards, surveillance, and eruption contingency planning. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23(3-4): 195-237. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90035-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90035-6)
- McKee, C., Itikarai, I. & Davies, H. (2017). Instrumental Volcano Surveillance and Community Awareness in the Lead-Up to the 1994 Eruptions at Rabaul, Papua New Guinea. https://doi.org/10.1007/11157_2017_4
- McLoughlin, D. (1986). A framework for integrated emergency management. *Public Administration Review*, 45: 165-172. <https://doi.org/10.2307/3135011>
- Miller, T. P. & Chouet, B. A. (1994). The 1989-1990 eruptions of Redoubt volcano: an introduction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1-4): [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90025-6)
- Miller, N. (1997). *War at Sea: A Naval History of World War II*. New York: Oxford University Press.
- Modenutti, B. E., Balseiro, E. G., Elser, J. J., Navarro, M. B., Cuassolo, F., Laspoumaderes, C., Souza, M. S. & Villanueva, V. D. (2013). Effect of volcanic eruption on nutrients, light, and phytoplankton in oligotrophic lakes. *Limnology and Oceanography*, 58(4): 1165-1175. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.4.1165>
- Molland, A. F. (2008). *The maritime engineering reference book: A guide to ship design, construction and operation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8987-8.x0001-7>
- Moore, J. G., Nakamura, K. & Alcaraz, A. (1966). The 1965 eruption of Taal volcano. *Science*, 151(3713): 955-960. <https://doi.org/10.1126/science.151.3713.955>
- Moreno, H. (1999). Mapa de peligros del Volcán Calbuco: región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Moreno, P. I., Alloway, B., Villarosa, G., Outes, V., Enriquez, W. I., De Pol-Holz, R. & Pearce, N. (2015). A past-millennium maximum in postglacial activity from Volcán Chaitén, southern Chile. *Geology*, 43(1). <https://doi.org/10.1130/G36248.1>
- Moriarty, K. D., Ni, D., & Collura, J. (2007). Modeling traffic flow under emergency evacuation situations: Current practice and future directions. In *Transportation Research Board 2007 Annual Meeting*.

- Morrissey, M., Zimanowski, B., Wohletz, K., & Büttner, R. (2000). Phreatomagmatic Fragmentation. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H. & Stix, J. (Eds.). Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press.
- Municipalidad de Villa La Angostura, VLA (2019a). <https://www.angosturainforma.gob.ar/esta-semana-comienzan-las-obras-de-emergencia-para-volver-a-conectar-villa-la-angostura-y-bariloche/>
- Municipalidad de Villa La Angostura, VLA (2019b). <https://www.angosturainforma.gob.ar/el-coem-continua-trabajando-en-la-asistencia-de-los-distintos-barrios/>
- Municipalidad de Villa La Angostura, VLA (2019c). <https://www.angosturainforma.gob.ar/el-sien-trabaja-en-villa-la-angostura-y-ruta-7-lagos/>
- Municipalidad de Villa La Angostura, Consejo Deliberante (2019a). Ordenanza N°3525/2019, Declaración de estado de emergencia municipal, 24 de junio de 2019. <https://villalaangostura.gov.ar/gobiernoabierto/ordenanzas/pdf/3109>
- Municipalidad de Villa La Angostura, Consejo Deliberante (2019b). Ordenanza N°3572/2019, Baja declaración de estado de emergencia municipal, 23 de septiembre de 2019. <https://villalaangostura.gov.ar/gobiernoabierto/ordenanzas/pdf/3158>
- Murray-Tuite, P. & Wolshon, B. (2013). Assumptions and processes for the development of no-notice evacuation scenarios for transportation simulations. International Journal of Mass Emergencies and Disasters, 31(1): 78-97. <https://doi.org/10.1177/028072701303100106>
- Nakamura, H. & Shimp, A. (2004). Seasonal Variations in the Southern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams as Revealed in a Reanalysis Dataset. Journal of Climate, 17(11): 1828-1844. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1828:SVITSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1828:SVITSH>2.0.CO;2)
- Naranjo, J. A. & Stern, C. R. (1998). Holocene explosive activity of Hudson Volcano, southern Andes. Bulletin of Volcanology, 59(4): 291-306. <https://doi.org/10.1007/s004450050193>
- Naranjo, J. A. & Stern, C. R. (2004). Holocene tephrochronology of the southernmost part (42° 30' - 45° S) of the Andean Southern Volcanic Zone. Revista Geológica de Chile 31(2): 225-240. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200003>
- Naranjo, J. A., Moreno, H. & Banks, N. (1993). La erupción del volcán Hudson en 1991 (4695), Región XI, Aisén, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín Nro. 9, 44.
- Neal, D. M. (1993). Integrating disaster research and practice: An overview of issues. International Journal of Mass Emergencies and Disasters, 11(1): 5-13. <https://doi.org/10.1177/028072709301100101>
- Neild, J., O'Flaherty, P., Hedley, P., Underwood, R., Johnston, D., Christenson, B. & Brown, P. (1998). Impact of a volcanic eruption on agriculture and forestry in New Zealand. MAF Policy Technical Paper 99/2. Wellington: Ministry of Agriculture and Fisheries.
- Newhall, C. G. & Dzurisin, D. (1988). Historical unrest at large calderas of the world. U.S. G.P.O., Bulletin 1855, 2 v. 1108.

- Newhall, C. G. & Hoblitt, R. P. (2002). Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology*, 64: 3–20. <https://doi.org/10.1007/s004450100173>
- Newhall, C. G. & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) - An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87: 1231-1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- Noh, H., Chiu, Y. C., Zheng, H., Hickman, M. & Mirchandani, P. (2009). Approach to Modeling Demand and Supply for a Short-Notice Evacuation. *Transportation Research Record*, 2091(1): 91-99. <https://doi.org/10.3141/2091-10>
- Oelkers, E. H. & Gislason, S. R. (2001). The mechanisms, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25 C and pH=3 and 11. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(21): 3671-3681. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00664-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00664-0)
- ONEMI, Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (2011a). <https://www.onemi.gov.cl/alerta/onemi-declara-alerta-roja-para-comunas-de-futroneo-lago-ranco-rio-bueno-y-puyehue-por-aumento/>
- ONEMI, Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (2011b). https://web.archive.org/web/20110607040329/http://www.onemi.cl/html/noticias/noticia_2503.html
- ONEMI, Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (2011c). <https://www.onemi.gov.cl/informate/autoridades-levantan-condicion-de-evacuacion-en-sectores-aledanos-al-complejo-volcanico-puyeh/>
- Orihashi, Y., Naranjo, J. A., Motoki, A., Sumino, H., Hirata, D., Anma, R. & Nagao, K. (2004). Quaternary volcanic activity of Hudson and Lautaro volcanoes, Chilean Patagonia: New constraints from K-Ar ages. *Revista Geológica de Chile*, 31(2): 207-224. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200002>
- Osman, S., Thomas, M., Crummy, J. & Carver, S. (2022). Investigation of geomechanical properties of tephra relevant to roof loading for application in vulnerability analyses. *Journal of Applied Volcanology*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00121-2>
- Outes, V., Villarosa, G., Delmenico, A., Lisarrague, M., Beigt, D., Manzoni, C. & Arretche, M. (2015). La erupción del Cordón Caulle 2011 en Villa La Angostura. Una experiencia de cooperación entre los sistemas científico y de protección civil. En: Viand, J. & Briones, F. (Eds.). *Riesgos al Sur: Diversidad de Riesgos de Desastres en Argentina. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, Buenos Aires.
- OVDAS, Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (2010-2012). REAV, Reportes Especiales de Actividad Volcánica, Actividad Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle 2010-2012, Región de Los Ríos, SERNAGEOMIN. <https://rnvv.sernageomin.cl/complejo-volcanico-puyehue-cordon-caulle/>

- OVDAS, Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (2011a). REAV, Reportes Especiales de Actividad Volcánica, Actividad del Volcán Hudson No. 14 & 15, Región de Aysén, SERNAGEOMIN. <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-hudson/>
- OVDAS, Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (2011b). REAV, Reportes Especiales de Actividad Volcánica, Actividad del Volcán Hudson No. 20-34, Región de Aysén, SERNAGEOMIN. <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-hudson/>
- OVDAS, Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (2015a). REAV, Reportes Especiales de Actividad Volcánica, Actividad del Volcán Calbuco Año 2015 Abril 22 (20:45 HL), Región de los Lagos, SERNAGEOMIN. <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-calbuco/>
- OVDAS, Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (2015b). REAV, Reportes Especiales de Actividad Volcánica, Actividad del Volcán Calbuco Año 2015 Abril 22 (22:30 HL), Región de los Lagos, SERNAGEOMIN. <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-calbuco/>
- OVDAS, Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (2015c). REAV, Reportes Especiales de Actividad Volcánica, Actividad del Volcán Calbuco Año 2015 Abril 23 (10:30 HL), Región de los Lagos, SERNAGEOMIN. <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-calbuco/>
- PAHO, Pan American Health Organization/World Health Organization (2021). ECC VCT La Soufriere Volcano Situation Report #2, #4, #6, #16, #17, #25 (10 de abril de 2021 al 18 de mayo de 2021). <https://www.paho.org/en/documents/ecc-vct-soufriere-volcano-situation-report-2;>
<https://www.paho.org/en/documents/ecc-vct-soufriere-volcano-situation-report-4;>
<https://www.paho.org/en/documents/ecc-vct-soufriere-volcano-situation-report-6;>
<https://www.paho.org/en/documents/ecc-vct-soufriere-volcano-situation-report-16;>
<https://www.paho.org/en/documents/ecc-vct-soufriere-volcano-situation-report-17;>
[https://www.paho.org/en/documents/ecc-vct-soufriere-volcano-situation-report-25](https://www.paho.org/en/documents/ecc-vct-soufriere-volcano-situation-report-25;)
- Pallister, J. S., Diefenbach, A. K., Burton, W. C., Muñoz, J., Griswold, J. P., Lara, L. E., Lowenstern, J. B. & Valenzuela, C. E. (2013). The Chaitén rhyolite lava dome: Eruption sequence, lava dome volumes, rapid effusion rates and source of the rhyolite magma. *Andean Geology*, 40(2): 277-294. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a06>
- Paton, D., Johnston, D. M. & Houghton, B. F. (1998) Organisational response to a volcanic eruption. *Disaster Prevention and Management An International Journal*, 7(1): 5-13. <https://doi.org/10.1108/09653569810206226>
- Paton, D., Smith, L., Daly, M. y Johnston, D. M. 2008. Risk perception and volcanic hazard mitigation: Individual and social perspectives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 172(3-4):179-188. <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.026>
- Perry, R.W., & Lindell, M.K. (2004). Preparedness for emergency response: guidelines for the emergency planning process. *Disasters*, 27(4): 336-350. <https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2003.00237.x>
- Perry, R. W. & Lindell, M. K. (2007). *Emergency Planning*. Hoboken, John Wiley.

- Perry, R. W. (1978). A classification scheme for evacuation. *Disasters*, 2(2-3): 169-170. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1978.tb00087.x>
- Perry, R. W. (1985). *Comprehensive Emergency Management: Evacuating Threatened Populations* (Vol. 3). Jai Press, London.
- Perry, R. W. (1991). *Managing Disaster Response Operations*. In: Drabek, T. & Hoetmer, G. (Eds.). *Emergency Management*. International City/County Management Association, Washington.
- Perry, R. W., Lindell, M. K. & Greene, M. R. (1981). *Evacuation Planning in Emergency Management*. Lexington, MA: Lexington Books.
- Petit-Breuilh, M. E. (1995). Evaluación del impacto de erupciones históricas en algunos volcanes de alto riesgo de Los Andes del Sur: Nevados del Chillán, Cordón Caulle, Osorno, Cakbuco y Hudson. Temuco, Chile [s.n.].
- Petit-Breuilh Sepúlveda, M. E. (2004). La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX). Serie Casa de los Volcanes No. 8. Ed. Servicio de Publicaciones Exmo, Cabildo Insular de Lanzarote, Huelva, Spain.
- Peyravi, M., Ahmadi, Marzaleh, M. & Khorram-Manesh, A. (2021). Disaster: General principles and management. En: Khorram-Manesh, A., Goniewicz, K., Hertelendy, A. & Dulebenets, M. (Eds.). *Handbook of Disaster and Emergency Management*, Second Edition. Kompendiet, Gothenburg, Sweden.
- PGB Chubut, Producto Bruto Geográfico (2019). <https://www.estadistica.chubut.gov.ar/>
- PGB Neuquén, Producto Bruto Geográfico (2018). https://www.estadisticaneuquen.gob.ar/#/pbg_base_2004
- PGB Río Negro, Producto Bruto Geográfico (2017). <https://www.bst.com.ar/wp-content/uploads/2020/07/Prospecto-Preliminar.pdf>
- Phillips, B. (2013). Pre-event planning for post-event recovery. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 31(3): 403-408. <https://doi.org/10.1177/028072701303100307>
- Pica, E. M. (2005). Geografía de la Región Andina Rionegrina. En: Rey, H. D. (Ed.). *La cordillera rionegrina: Economía, Estado y Sociedad en la primera mitad del siglo XX*. Editorial 2010 Bicentenario.
- Pichler, H. & Zeil, W. (1971). The Cenozoic rhyolite-andesite association of the Chilean Andes. *Bulletin of Volcanology*, 35(2): 424-452. <https://doi.org/10.1007/BF02596965>
- Pierson, T. C., Major, J. J., Amigo, A. & Moreno, H. (2013). Acute sedimentation response to rainfall following the explosive phase of the 2008-2009 eruption of Chaitén volcano, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 75(5): 723. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0723-4>
- Platt, R. H. (1991). Lifelines: an emergency management priority for the United States in the 1990s. *Disasters*, 15(2): 172-176. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1991.tb00446.x>

- PNNH, Parque Nacional Nahuel Huapi (2019). Plan de Gestión del Parque Nacional Nahuel Huapi. <https://www.nahuelhuapi.gov.ar/plangestion.html>
- Ponce, R. F. (1976). The Hudson Volcano. Symposium on Andean and Antarctic Volcanology Problems, Santiago, Chile. Stabilimento tipografico F. Giannini.
- Pope, E., Tailing, P. y Carter, L. (2016). Which earthquakes trigger damaging submarine mass movements: Insights from a global record of submarine cable breaks. *Marine Geology*, 384(3): 131-146. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.01.009>
- Potter, S. H., Scott, B. J., Jolly, G. E., Johnston, D. M. & Neall, V. E. (2015). A catalogue of caldera unrest at Taupo Volcanic Centre, New Zealand, using the volcanic unrest index (VUI). *Bulletin of Volcanology*, 77(9): 78. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0956-5>
- Prata, F. & Rose, W. I. (2015). Volcanic ash hazards to aviation. In: Sigurdsson, H. (Ed.). *The Encyclopedia of Volcanoes*, Second Edition. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00175-7>
- Yong, Q., Hayes, J., Fitzgerald, R., Lerner, G., Jenkins, S., Wilson, T. M., Scheele, F., Lukovic, B. & Fleischmann, C. (2023). Fire From Volcanic Activity: Quantifying the threat from an understudied hazard. *Fire Safety Journal*, 141, 103935. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103935>
- Quarantelli, E. L. (1980). *Evacuation Behavior and Problems: Findings and Implications from the Research Literature*. Ohio State Univ Columbus Disaster Research Center.
- Quarantelli, E. L. (1982). *Ten research-derived principles of disaster planning*. National Emergency Training Center.
- Ramos, V. & Folguera, A. (2009). Andean flat-slab subduction through time. *Geological Society, London, Special Publications*, 327: 31-54. <https://doi.org/10.1144/SP327.3>
- Rawson, K. J. & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship Theory*, Vol. 1. Butterworth-Heinemann.
- REGINAVE (2019). Nuevo Régimen de la Navegación Marítima, Fluvial y Lacustre. Boletín Oficial, Decreto Nro. 770/2019. <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/221231/20191114>
- Rhorne, J. R., & Brown, D. P. (2006). *Tropical Cyclone Report: Hurricane Katrina: 23-30 August 2005*. Centro Nacional de Huracanes.
- Richter, C. F. (1958). *Elementary Seismology*. Freeman, San Francisco.
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P. & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(6): 11–25. <https://doi.org/10.1109/37.969131>
- Rodríguez Torrent, J. C., Reyes Herrera, S. & Mandujano Bustamante, F. (2016). El proyecto nueva Chaitén: La asincronía entre Estado, academia y comunidad. *AUS*, (19): 73-79. <https://doi.org/10.4206/aus.2016.n19-12>

- Romero, J., Viramonte, J. G., & Scasso, R. A. (2013). Indirect tephra volume estimations using theoretical models for some Chilean historical volcanic eruptions with sustained columns. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 54(2): 194-197.
- Romero, J., Bustillos, J. & Viramonte, J. (2015). Tephra fallout deposits: A brief review on its quantification and analysis for the classification of explosive volcanic eruptions, with Latin-American examples. *Pyroclastic Flow*, 5: 1-33.
- Romero, J., Morgavi, D., Arzilli, F., Daga, R., Caselli, A., Reckziegel, F., Viramonte, J., Díaz-Alvarado, J., Polacci, M., Burton, M. & Perugini, D. (2016). Eruption dynamics of the 22–23 April 2015 Calbuco Volcano (Southern Chile): Analyses of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 317: 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.027>
- Romero Lankao, P. & Qin, H. (2011). Conceptualizing urban vulnerability to global climate and environmental change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3): 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.12.016>
- Rossetto, T. & Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering Structures*, 25(10): 1241-1263. [http://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00060-9](http://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00060-9)
- Rossetto, T., Kappos, A. J., Kouris, L. A., Indirli, M., Borg, R. P., Lloyd, T. O., Sword-Daniels, V. (2010). Comparison of damage assessment methodologies for different natural hazards. COST ACTION C26: Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events - Proceedings of the Final Conference.
- Rouquette, S., Jacquez, L., Vries, B. y Franco, L. 2023. Exploring the best communication channels to inform a local population about volcanic risk: Comparing information approaches at El Misti, Arequipa, Peru. *Volcanica*. 6: 45-62. <http://doi.org/10.30909/vol.06.01.4562>
- Rubin, C. H., Noji, F. K., Seligman, P. J., Holtz, J. L., Grande, J. & Vittani, F. (1994). Evaluating a fluorosis hazard after a volcanic eruption. *Archives of Environmental Health*, 49(5): 395-397. <https://doi.org/10.1080/00039896.1994.9954992>
- Saleh, I. M. & Abuhdima, E. M. (2011). Effect of sand and dust storms on microwave propagation signals in Southern Libya. *Journal of Energy and Power Engineering*, 5(12): 1199-1204. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2011.12.014>
- Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D. & Outes, V. (2022). Water evacuations in remote tourist regions: evaluating case studies from natural hazards in North Patagonian lakes, Argentina. *Journal of Mountain Science*, 19(6): 1782-1807. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7207-3>
- Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D., Outes, V., Stewart, C. & Baranzini, F. (2023). Impacts on water transport networks after three widespread volcanic ashfalls in Andean Patagonian lakes. *Volcanica*, 6(2): 173-200. <https://doi.org/10.30909/vol.06.02.173200>

- Salgado, P. A., Villarosa, G., Beigt, D. & Outes, V. (2024). Communicating recommendations for the nautical sector in the event of volcanic ashfall. *Boletín Geográfico*, 46(1): 13-30. 46, <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s2313903x/8cduzgehd>
- Salganik, M. J. & Heckathorn, D. D. (2004). Sampling and estimation in hidden populations using respondent-driven sampling. *Sociological Methodology*, 34(1): 193-240. <https://doi.org/10.1111/j.0081-1750.2004.00152.x>
- Santos, G. & Aguirre, B. (2005). A Critical Review Of Emergency Evacuation Simulation Models. NIST Workshop on Building Occupant Movement During Fire Emergencies.
- Sawalha, I. H. (2020). A contemporary perspective on the disaster management cycle. *Foresight*, 22(4): 469-482. <https://doi.org/10.1108/FS-11-2019-0097>
- SAYDS, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2014). Third National Communication on Climate Change. Climate Change in Argentina; Trends and Projections. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Buenos Aires, Argentina.
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF00304107>
- Schadschneider, A., Chowdhury, D. & Nishinari, K. (2010). Stochastic Transport in Complex Systems: From Molecules to Vehicles. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52853-7.00016-6>
- Schmidt, J., Matcham, I., Reese, S., King, A., Bell, R., Henderson, R., Smart, G., Cousins, J., Smith, W. & Heron, D. (2011). Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling. *Natural Hazards*, 58(3): 1169–1192. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9721-z>
- Schön, J. H. (2011). Physical Properties of Rocks: A Workbook. Elsevier.
- Scott, W. E. & McGimsey, R. G. (1994). Character, mass, distribution, and origin of tephra-fall deposits of the 1989-1990 eruption of Redoubt volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1-4): 251-172. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90036-1)
- Scott, W., Nye, C., Waythomas, C. & Neal, C. (2010). August 2008 Eruption of Kasatochi Volcano, Aleutian Islands, Alaska—Resetting an Island Landscape. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 42: 250-259. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-42.3.250>
- Segschneider, B., Landis, C. A., White, J. D. L., Wilson, C. J. N. & Manville, V. (2002). Resedimentation of the 1.8 ka Taupo ignimbrite in the Mohaka and Ngaruroro river catchments, Hawke's Bay, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 45(1): 85–101. <https://doi.org/10.1080/00288306.2002.9514961>
- Sellés, D. & Moreno, H. (2011). Geología del volcán Calbuco, Región de los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 20(1).

- Seluchi, M., Saulo, A., Nicolini, M. & Satyamurty, P. (2003). The Northwestern Argentinean Low: a study of two typical events. *Monthly Weather Review*, 131: 2361-2378. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<2361:TNALAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<2361:TNALAS>2.0.CO;2)
- Sigurdsson, H., Cashdollar, S. & Sparks, S. R. (1982). The eruption of Vesuvius in AD 79: Reconstruction from historical and volcanological evidence. *American Journal of Archaeology*, 39-51. <https://doi.org/10.2307/504292>
- Sigurdsson, H., Carey, S., Cornell, W. & Pescatore, T. (1985). The eruption of Vesuvius in AD 79. *National Geographic Research*, 1(3): 332-387.
- Singer, B. S., Jicha, B. R., Harper, M. A., Naranjo, J. A., Lara, L. E. & Moreno-Roa, H. (2008). Eruptive history, geochronology, and magmatic evolution of the Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 120(5-6): 599-618. <https://doi.org/10.1130/B26276.1>
- SMEC International Pty Ltd (1997). The Investigation, survey and design of the restoration of Rabaul town roads, drainage and civil infrastructure, Phase I. Technical report, 1-94.
- Smith, K. (2013). *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*. Routledge.
- SNMF, Servicio Nacional de Manejo del Fuego, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021). Reporte diario de incendios 2021. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/manejo-del-fuego/reporte-diario-de-incendios/2021>
- SNMF, Servicio Nacional de Manejo del Fuego, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022). Reporte diario de incendios 2022. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/manejo-del-fuego/reporte-diario-de-incendios/2022>
- Song, D.-W. & Panayides, P. (2015). *Maritime logistics: A guide to contemporary shipping and port management*. Kogan Page Publishers.
- Sorensen, J. & Mileti, D. (1987). Decision-making Uncertainties in Emergency Warning System Organizations. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 5(1): 33-61. <https://doi.org/10.1177/028072708700500103>
- Southworth, F. (1991). Regional evacuation modeling: A state-of-the-art review. ORNLTM/1740. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA. <https://doi.org/10.2172/814579>
- Sparks, R. S. J. (1986). The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology*, 48: 3-15. <https://doi.org/10.1007/BF01073509>
- Sparks, R. S. J. (2003). Forecasting volcanic eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(1-2): 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00124-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00124-9)
- Sparks, R. S. J., Bursik, M. I., Carey, S. N., Gilbert, J. S., Glaze, L. S., Sigurdsson, H. & Woods, A. W. (1997). *Volcanic Plumes*. John Wiley and Sons.

- Sparks, R. S. J., Aspinall, W. P., Crosweller, H. S. & Hincks, T. K. (2013). Risk and Uncertainty Assessment of Volcanic Hazards. In: Rougier, J., Sparks, R. S. J. & Hill, L. (Eds.). Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards. Cambridge University Press, Cambridge.
- Spence, R. J. S., Pomonis, A., Baxter, P. J., Coburn, A. W., White, M. & Dayrit, M. (1996). Building damage caused by the Mount Pinatubo eruption of June 15, 1991. In: Newhall, C.G. & Punongbayan R. (Eds.). Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City.
- Spence, R. J. S., Zuccaro, G., Petrazzuoli, S. & Baxter, P. J. (2004). Resistance of buildings to pyroclastic flows: analytical and experimental studies and their application to Vesuvius. *Natural Hazards Review*, 5: 48–59. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2004\)5:1\(48\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2004)5:1(48))
- Stern, C. R. & Naranjo, J. A. (1995). Summary of the Holocene eruptive history of the Hudson Volcano. In: The August 1991 eruption of the Hudson Volcano (Patagonian Andes): a thousand days after. Göttingen: Cuvillier.
- Stern, C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, 31(2): 161-206. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200001>
- Stern, C. R. (2020). The role of subduction erosion in the generation of Andean and other convergent plate boundary arc magmas, the continental crust and mantle. *Gondwana Research*, 88(2): 220-249. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.08.006>
- Stevenson, J. A., Loughlin, S., Rae, C., Thordarson, T., Milodowski, A. E., Gilbert, J. S., Harangi, S., Lukács, R., Højgaard, B., Árting, U., Pyne-O'Donnell, S., MacLeod, A., Whitney, B. & Cassidy, M. (2012). Distal deposition of tephra from the Eyjafjallajökull 2010 summit eruption. *Journal of Geophysical Research*, 117(B00C10): 1-10. <https://doi.org/10.1029/2011JB008904>
- Stewart, C., Leonard, G. S., Horwell, C. J., Thordarson, T. & Cronin, S. J. (2006). Contamination of water supplies by volcanic ashfall: A literature review and simple impact modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158: 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.002>
- Stewart, C., Pizzolon, L., Wilson, T. M., Leonard, G., Dewar, D., Johnston, D. & Cronin, S. (2009). Can volcanic ash poison water supplies. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5(4): 713-716. https://doi.org/10.1897/ieam_2009-062.1
- Stewart, C., Wilson, T. M., Leonard, G. S., Johnston, D. M., Cole, J. W., Cronin, S. & Johnston, D. (2011). Volcanic hazards and water shortages. In: Briggs, A. C. (Ed.). *Water Shortages: Environmental, Economic and Social Impacts*. Nova Publishers.
- Strauss, A. & Corbin, J. (1990). The Basics of Qualitative Research. *Journal of Marketing Research*, 15(3). <https://doi.org/10.2307/3172751>
- Strong, K., Carpenter, O. & Ralph, D. (2020). Developing scenarios for the insurance industry. Cambridge Centre for Risk Studies at the University of Cambridge Judge Business School and

- Lighthill Risk Network. Retrieved from https://lighthillrisknetwork.org/wpcontent/uploads/Insurance_DevelopingScenarios
- Sword-Daniels, V., Wardman, J., Stewart, C., Wilson, T. M., Johnston, D. M. & Rossetto, T. (2011). Infrastructure impacts, management and adaptations to eruptions at Volcán Tungurahua, Ecuador, 1999–2000. GNS Science Report 2011/24.
- Sword-Daniels, V., Wilson, T.M., Sargeant, S., Rossetto, T., Twigg, J., Johnston, D.M., Loughlin, S.C., Cole, P.D., 2014. Consequences of long-term volcanic activity for essential services in Montserrat: challenges, adaptations and resilience. Memoir of the Geological Society of London Special volume "The Eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat from 2000-2010".
- Taylor, D. A. (1996). Introduction to marine engineering. Elsevier.
- Teruggi, M. E. (1982). Diccionario sedimentológico, Vol.1: Rocas Clásicas y Piroclásticas. Ediciones Científicas y Argentinas, Libart.
- Thompson, J. (2011). Dunkirk: Retreat to Victory. New York: Arcade.
- Thorarinsson, S. (1944). Tefrokronologiska studier pa Island; Thjorsardalur och dess foeroedelse; Tephrochronological studies in Iceland. Geografiska Annaler, 1(2): 1-217.
- Tierney, K. J., Lindell, M. K. & Perry, R. W. (2002). Facing the unexpected: Disaster preparedness and response in the United States. Disaster Prevention and Management, 11(3): 222-232. <https://doi.org/10.1108/dpm.2002.11.3.222.1>
- Time (1976). The world: Under the volcano. Lunes 30 de agosto de 1976. <https://content.time.com/time/subscriber/article/0,33009,918253,00.html>
- Tobin, G. A. & Whiteford, L. M. (2002). Community resilience and volcano hazard: The eruption of Tungurahua and evacuation of the faldas in Ecuador. Disasters, 26(1): 28-48. <https://doi.org/10.1111/1467-7717.00189>
- Tobin, G. A., Montz, B. E. & Whiteford, L. M. (2013). Evacuation. In: Bobrowsky, P. (Ed.). Encyclopedia of Natural Hazards. Springer Dordrecht, Heidelberg, New York, London.
- Tomsen, E., Lindsay, J. M., Gahegan, M., Wilson, T. M. & Blake, D. (2014). Evacuation planning in the Auckland Volcanic Field, New Zealand: a spatio-temporal approach for emergency management and transportation network decisions. Journal of Applied Volcanology, 3(1): 1-22. <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-6>
- Toyos, G., Mingari, L., Pujol, G. & Villarosa, G. (2017). Investigating the nature of an ash cloud event in Southern Chile using remote sensing: volcanic eruption or resuspension? Remote Sensing Letters, 8: 146-155. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1239281>
- TSG, Transportadora de Gas del Sur (2019). <https://www.tgs.com.ar/Prensa/Detalle?aid=2796>
- Tuffen, H., James, M. R., Castro, J. M. & Schipper, C. I. (2013). Exceptional mobility of an advancing rhyolitic obsidian flow at Cordón Caulle volcano in Chile. Nature Communications, 4: 2709. <https://doi.org/10.1038/ncomms3709>

- Tupper, E. C. (2004). Introduction to naval architecture, Fourth Edition. Butterworth-Heinemann.
- Turner, R., Paulik, R., Smart, G., Bind, J., Gray, S., Yang, E., Asora, L., Leiofi, M. & Flay, R. (2013). Damage surveys following the Hobsonville Tornado in Auckland and Tropical Cyclone Evan in Samoa. 16th Australasian Wind Engineering Society Workshop, Brisbane, Australia.
- UN General Assembly (2016). Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. New York, NY, USA: United Nations. p. 41. https://www.preventionweb.net/files/50683_oiewgreportenglish.pdf
- UNCTAD, United Nations Conference on Trade and Development (2006). Review of maritime transport 2006. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2006_en.pdf
- UNCTAD, United Nations Conference on Trade and Development (2020). Review of maritime transport 2020. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf
- UNDRO, Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator (1991). Managing natural disasters: phenomena, effects and options: a manual for policy makers and planners. Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, Geneva. <https://digitallibrary.un.org/record/126700>
- UNISDR (2011) HFA Progress in Asia-Pacific: Regional Synthesis Report 2009–2011. United Nations Office for Disaster Risk Reduction - Regional Office for Asia and Pacific (UNISDR AP).
- Urbina, E. & Wolshon, B. (2003). National review of hurricane evacuation plans and policies: A comparison and contrast of state practices. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 37(3): 257-275. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(02\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00015-0)
- Utasse, M., Jomelli, V., Grancher, D., Frédéric, L., Brunstein, D. & Virmoux, C. (2016). Territorial accessibility and decision-making structure related to debris flow impacts on roads in the French Alps. International Journal of Disaster Risk Science, 7: 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0088-3>
- Valentine, G. A. (2003). Towards integrated natural hazard reduction in urban areas. AGU Special Publication, 56: 63-74. <https://doi.org/10.1029/SP056p0063>
- Van Eaton, A. R., Amigo, Á., Bertin, D., Mastin, L. G., Giacosa, R. E., González, J., Valderrama, O., Fontijn, K. & 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. <https://doi.org/10.1002/2016gl068076>
- Veblen, T. T. (2010). Wildfire Risk and Hazard in Northern Patagonia, Argentina. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8736-2_35
- Veblen, T. T., Kitzberger, T., Raffaele, E. & Lorenz, D. (2003). Fire History and Vegetation Changes in Northern Patagonia, Argentina. https://doi.org/10.1007/0-387-21710-X_9
- Veblen, T. T., Kitzberger, T., Raffaele, E., Mermoz, M., González, M., Sibold, J. & Holz, A. (2008). The historical range of variability of fires in the Andean-Patagonian Nothofagus forest region. International Journal of Wildland Fire, 17(6): 724-741. <https://doi.org/10.1071/WF07152>

- Veblen, Thomas & Holz, Andrés & Paritsis, Juan & Raffaele, Estela & Kitzberger, Thomas & Blackhall, Melisa. (2011). Adapting to global environmental change in Patagonia: What role for disturbance ecology? *Austral Ecology*, 36(8): 891-903. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2010.02236.x>
- Viale, M., Valenzuela, R., Garreaud, R. & Ralph, F. M. (2018). Impacts of atmospheric rivers on precipitation in Southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19: 1671–1687. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0006.1>
- Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J. & Zalazar, L. (2019). Contrasting Climates at Both Sides of the Andes in Argentina and Chile. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 69. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069>
- Villarosa, G. & Outes, V. (2013). La erupción del Cordón Caulle del 4 de junio de 2011: Mapa de distribución, características de la ceniza volcánica caída en la región e impactos en la comunidad. En *Efectos de la caída de cenizas del Complejo Volcánico Puyehue (CPCC) sobre la región del lago Nahuel Huapi*. Editado por Legislatura de Neuquén y Centro Regional Universitario Bariloche. Volumen [Informe Final]. Universidad Nacional del Comahue.
- Villarosa, G., Outes, V., Hajduk, A., Crivelli, E., Selles, D., Fernandez, M. & Crivelli, E. (2006). Explosive volcanism during the Holocene in the Upper Limay River Basin: The effects of ashfalls on human societies, Northern Patagonia, Argentina. *Quaternary International*, 158: 44-57. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.016>
- Villarosa, G., Outes, V., Gomez, E. A., Chapron, E. & Ariztegui, D. (2009). Origen del tsunami de mayo de 1960 en el Lago Nahuel Huapi, Patagonia: aplicación de técnicas batimétricas y sísmicas de alta resolución. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(3): 593-597.
- Villarosa, G., Schneider, M., Outes, V., et al. (2013). Avalanche hazard assessment in the Nahuel Huapi National Park linked to the Cordón Caulle volcanic eruption (pp. 77). *Asesoría Institucional, convenio CONICET-Administración de Parques Nacionales*, Res. CONICET N°3318/2011.
- Villarosa, G., Beigt, D., Outes, V., Amat, P. & Salgado, P. (2023). Las múltiples dimensiones del fenómeno volcánico en la Patagonia Norte: Aportes científicos interdisciplinarios del Grupo GEA para el estudio de la erupción del Cordón Caulle. En: Murriello, S. & Barrios García, G. (Eds.). *A diez años de la erupción del Puyehue-Cordón Caulle*. Universidad Nacional de Río Negro, 57-96. <https://doi.org/10.4000/books.eunrn.20073>
- Vogt, B. M. & Sorensen, J. H. (1992). Evacuation research: A reassessment (No. ORNL/TM-11908). Oak Ridge National Laboratory, TN, United States. <https://doi.org/10.2172/6816691>
- Volaire, P. J. (1767). Éruption du Vésuve et vue de Portici (óleo al lienzo). Museo de Artes de Nantes, Nantes, Francia.
- Wachtel, G., Schmöcker, J. D., Hadas, Y., Gao, Y., Nahum, O. & Ben-Moshe, B. (2021). Planning for tourist urban evacuation routes: A framework for improving the data collection and evacuation processes. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(28): 1-18. <https://doi.org/10.1177/2399808321994575>

- Wadge, G. (2009). Assessing the pyroclastic flow hazards from dome collapse at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. In: Thordarson, T., Self, S., Larsen, G., Rowland, S. K. & Höskuldsson, Á. (Eds.). *Studies in Volcanology: The Legacy of George Walker*. Special Publication of IAVCEI.
- Wardman, J., Wilson, T. M., Bodger, P. S., Cole, J. W. & Johnston, D. M. (2012). Investigating the electrical conductivity of volcanic ash and its effect on HV power systems. *Physics and Chemistry of the Earth A/B/C*, 45: 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.09.003>
- Wardman, J., Wilson, T. M., Bodger, P. S., Cole, J. W. & Stewart, C. (2012b). Potential impacts from tephra fall to electric power systems: A review and mitigation strategies. *Bulletin of Volcanology*, 74: 2221–2241. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0664-3>
- Wardman, J., Sword-Daniels, V., Stewart, C., Wilson, T., 2012a. Impact assessment of the May 2010 eruption of Pacaya volcano, Guatemala. GNS Science Report 2012/09.
- Watt, S. F. L., Pyle, D. M., Mather, T. A., Martin, R. S. & Matthews, N. E. (2009). Fallout and distribution of volcanic ash over Argentina following the May 2008 explosive eruption of Chaiten, Chile. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(B4). <https://doi.org/10.1029/2008JB006219>
- Watt, S. F. L., Pyle, D. M. & Mather, T. A. (2013). Evidence of mid- to late-Holocene explosive rhyolitic eruptions from Chaiten volcano, Chile. *Andean Geology*, 40(2): 216-226. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a02>
- WBG, The World Bank Group (2023). Disaster Risk Management. <https://www.bancomundial.org/es/topic/disasterriskmanagement/overview#1>
- White, J. F. L. & Houghton, B. F. (2006). Primary volcaniclastic rocks. *Geology*, 34: 677-680. <https://doi.org/10.1130/G22346.1>
- Whitham, A. G. & Sparks, R. S. J. (1986). Pumice. *Bulletin of Volcanology*, 48: 209-223. <https://doi.org/10.1007/BF01087675>
- Wiemer, G., Moernaut, J., Stark, N., Kempf, P., De Batist, M., Pino, M., Urrutia, R., de Guevara, B. L., Strasser, M. & Kopf, A. (2015). The role of sediment composition and behavior under dynamic loading conditions on slope failure initiation: a study of a subaqueous landslide in earthquakeprone South-Central Chile. *International Journal of Earth Sciences* 104(5): 1439-1457. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1144-8>
- Williams, R. S. & Moore, J. G. (2008). *Man against volcano: The eruption on Heimaey, Vestmannaeyjar, Iceland*. U.S. Geological Survey General Interest Publication, 27. <https://doi.org/10.3133/70039211>
- Williams, R. S. (2008). *Man Against Volcano: The Eruption on Heimaey, Vestmannaeyjar, Iceland*. DIANE Publishing.
- Williams, G., Jenkins, S., Daniel, L. & Wee, S. J. (2021). How rainfall influences tephra fall loading - an experimental approach. *Bulletin of Volcanology*, 83(6). <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01465-0>

- Wilson, T. M. & Cole, J. W. (2007). Potential impact of ash eruptions on dairy farms from a study of the effects on a farm in eastern Bay of Plenty, New Zealand; implications for hazard mitigation. *Natural Hazards*, 43(1): 103–128. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9111-8>
- Wilson, P. A. (2018). *Basic Naval Architecture*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72805-6>
- Wilson, T. M., Cronin, S., Cole, J., & Johnston, D. (2009a). Vulnerability of pastoral farming systems to volcanic ashfall hazards (Doctoral Thesis). University of Canterbury, Christchurch. <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/5978>
- Wilson, T. M., Daly, M. & Johnston, D. (2009b). Review of Impacts of Volcanic Ash on Electricity Distribution Systems, Broadcasting and Communication Networks. Auckland Engineering Lifelines Group Project AELG-19. Auckland Regional Council Technical Publication 051, April 2009.
- Wilson, T. M., Leonard, G. S., Stewart, C., Baxter, P. J., Villarosa, P. J., Rovere, E. I., Johnston, D. & Cronin, S. J. (2009c). Impacts on agriculture following the May 2008 Chaitén eruption in Patagonia. Geological Society of America (GSA) Annual Meeting Abstracts. Volume 41. 7. Portland, OR, USA, 493.
- Wilson, T. M., Leonard, G. S., Stewart, C., Villarosa, G., Rovere, E. I., Baxter, P. J., Johnston, D. & Cronin, S. J. (2009d). Impacts on critical infrastructure following the May 2008 Chaitén eruption in Patagonia. Geological Society of America (GSA) Annual Meeting Abstracts. Volume 41. 7. Portland, OR, USA, 431.
- Wilson, T. M., Stewart, C., Cole, J., Johnston, D. & Cronin, S. (2009e). Vulnerability of farm water supply systems to volcanic ash fall. *Environmental Earth Sciences*, 61(4): 675-688. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0380-2>
- Wilson, T. M., Cole, J., Stewart, C., Cronin, S. & Johnston, D. (2010a). 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. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0396-1>
- Wilson, T. M., Stewart, C., Cole, J. W., Johnston, D. M. & Cronin, S. J. (2010b). Vulnerability of agricultural water supplies to volcanic ash fall. *Environmental Earth Science*, 61(4): 675-688. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0380-2>
- Wilson, T. M., Cole, J., Cronin, S., Stewart, C. & Johnston, D. (2011). Impacts on agriculture following the 1991 eruption of Vulcan Hudson, Patagonia: Lessons for recovery. *Natural Hazards*, 57: 185-212. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9604-8>
- Wilson, T. M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G. S., Johnston, D. M., Cole, J. W., Wardman, J. Wilson, G. & Barnard, S. T. (2012a). Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 45–46: 5–23. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.006>

- Wilson, T. M., Cole, J., Johnston, D., Cronin, S., Stewart, C. & Dantas, A. (2012b). Short- and long-term evacuation of people and livestock during a volcanic crisis: Lessons from the 1991 eruption of Volcán Hudson, Chile. *Journal of Applied Volcanology* 1(2): 1-11. <https://doi.org/10.1186/2191-5040-1-2>
- Wilson, T. M., Stewart, C., Bickerton, H., Baxter, P., Outes, V., Villarosa, G. & Rovere, E. (2013). Impacts of the June 2011 Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex eruption on urban infrastructure, agriculture and public health. GNS Science Report 2012/20.
- Wilson, G., Wilson, T. M., Deligne, N. I. & Cole, J. (2014a). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>
- Wilson, T. M., Stewart, C., Wardman, J., Wilson, G., Johnston, D., Hill, D., Hampton, S., Villemure, M., McBride, S., Leonard, G. S., Daly, M., Deligne, N. & Roberts, L. (2014b). Volcanic ashfall preparedness poster series: a collaborative process for reducing the vulnerability of critical infrastructure. *Journal of Applied Volcanology* 3: 10. <http://doi.org/10.1186/s13617-014-0010-x>
- Wilson-Goure, S., Houston, N. & Easton, A. V. (2006). Assessment of the State of the Practice and State of the Art in Evacuation Transportation Management. Task Three. Technical Memorandum for Federal Highway Administration (ITS-JPO) on Case Studies (No. FHWA-HOP-08-014).
- Witham, C. S. (2005). Volcanic disasters and incidents: A new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148: 191-233. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.04.017>
- Witham, C. S., Oppenheimer, C. & Horwell, C. J. (2005). Volcanic ash leachates: A review and recommendations for sampling methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141: 299-326. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.11.010>
- Wolshon, B. & Donahue, A. (2013). Emerging developments in evacuation methods, planning, and analysis. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 31(1): 1-3. <https://doi.org/10.1177/028072701303100101>
- Woodyard, D. (2009). *Pounder's marine diesel engines and gas turbines*. Butterworth-Heinemann.
- Zeigler, D. J., Brunn, S. D. & Johnson Jr, J. H. (1981). Evacuation from a nuclear technological disaster. *Geographical Review*, 1-16. <https://doi.org/10.2307/214548>
- Zimmerman, C., Brodesky, R. & Karp, J. (2007). Using highways for no-notice evacuations: Routes to effective evacuation planning primer series (No. FHWA-HOP-08-003). United States. Federal Highway Administration. Office of Operations.
- Zockaie, A., Mahmassani, H., Saberi, M. & Verbas, O. (2014). Dynamics of Urban Network Traffic Flow During a Large-Scale Evacuation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2422: 21-33. <https://doi.org/10.3141/2422-03>
- Zuccaro, G., Cacace, F., Spence, R. J. & Baxter, P. J. (2008). Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(3): 416-453. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.005>