

Bariloche. Ribera del lago Nahuel Huapi  
cubierta por las cenizas del volcán Cordón  
Caulle. Foto G Villarosa



Débora Beigt, Gustavo Villarosa, Valeria Outes y M Andrea Dzendoletas

Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente (Uncoma-Conicet)

Eduardo A Gómez

Instituto Argentino de Oceanografía (UNS-Conicet)

# El lago Nahuel Huapi: un registro de erupciones, deslizamientos y tsunamis

**D**esde hace algunos años, investigadores del Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente (Universidad Nacional del Comahue-Conicet) y del Instituto Argentino de Oceanografía (Universidad Nacional del Sur-Conicet) estudian los sedimentos y la topografía del lecho del lago Nahuel Huapi. Uno de sus objetivos es analizar los tsunamis lacustres desencadenados por movimientos en masa de sedimentos del fondo lacustre. Se trata de investigaciones novedosas en el país que están abriendo inéditas perspectivas sobre el comportamiento de los lagos an-

dinos de Patagonia Norte frente a la ocurrencia de terremotos de magnitud en la región.

## Sismicidad, vulcanismo y movimientos en masa de sedimentos lacustres

Los lagos son ambientes en los que se depositan materiales transportados por los ríos que drenan las cuen-

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

Debajo de la superficie de las aguas del lago Nahuel Huapi tienen lugar deslizamientos de grandes volúmenes de sedimentos acumulados en el fondo, que hacen que algunas áreas costeras (incluidas las de poblaciones ribereñas) puedan ser afectadas por olas extraordinarias, especialmente en caso de verificarse algún sismo de magnitud.

cas circundantes. A causa de ello, los sedimentos de los fondos lacustres son excelentes registros de la historia ambiental del área. Prácticamente todo lo ocurrido en el lago o en la zona cuyas aguas drenan hacia él se verá reflejado de alguna forma en los sedimentos depositados en su lecho.

La depresión que actualmente ocupa el lago Nahuel Huapi se formó por la acción de fuerzas similares a las que elevaron a la cordillera de los Andes y por la importante erosión que produjeron los grandes glaciares que cubrieron el área varias veces durante los últimos millones de años. El retiro del hielo dejó grandes depresiones que fueron ocupadas por las cristalinas aguas que descienden del entorno montañoso para formar el lago actual. Debajo de la superficie del lago se esconde un ambiente altamente dinámico, en el que ocurren procesos difícilmente visibles. Las pronunciadas pendientes costeras que caracterizan a este y a otros lagos de la región favorecen que las masas de sedimentos se movilizan por acción gravitatoria. Esos movimientos se denominan técnicamente *remoción en masa*.

La situación geológica de la región andina norpatagónica, expuesta a frecuente actividad sísmica y volcánica, permite comprender el origen de estos fenómenos, cuyo estudio es importante para evaluar los peligros naturales en las costas lacustres y su entorno.

Charles Darwin fue el primero en sugerir la existencia de un vínculo entre terremotos y vulcanismo; lo hizo después de analizar el terremoto ocurrido en 1833 en la zona de Concepción y del volcán Osorno, como se puede leer en un artículo que publicó en los *Proceedings of the Geological Society* de Londres (2: 654-660, 1838, accesible en [http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1840\\_volcanic\\_F1656.pdf](http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1840_volcanic_F1656.pdf)).

Para entender la relación entre sismicidad, vulcanismo y remoción en masa en los lagos norpatagónicos debemos recurrir a la teoría de la tectónica de placas, según la cual la capa externa de la Tierra, una corteza sólida y

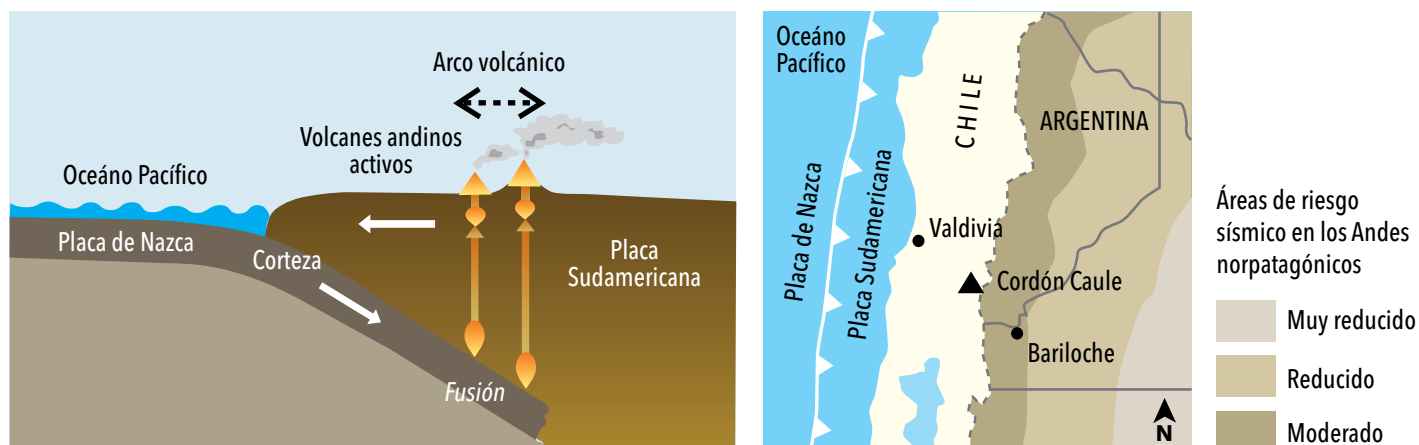
rígida denominada *litosfera*, se encuentra dividida en fragmentos o placas que se mueven unas con respecto a las otras. En el caso que nos ocupa, en el borde occidental de América del Sur convergen dos placas litosféricas: la Sudamericana, continental, y la de Nazca, oceánica.

La placa de Nazca se mueve hacia el este y se desliza bajo la placa Sudamericana, que se desplaza en sentido opuesto. Las deformaciones, las fracturas y los reajustes entre estas dos placas, que convergen a velocidades de aproximadamente 8 a 9 cm por año, provocan periódicamente la liberación de grandes cantidades de energía bajo la forma de terremotos. Además, el deslizamiento de una placa por debajo de la otra, llamado *subducción*, da lugar a fusión de parte de las rocas introducidas en profundidad, generando *magma* que puede ascender luego, atravesando la corteza y alcanzar la superficie, produciendo erupciones volcánicas (figura 1).

La actividad volcánica del planeta se concentra en ambientes como el descrito, los que se alinean mayormente a lo largo de las costas del océano Pacífico. Es el denominado *cinturón de fuego del Pacífico*, una extensa zona de subducción con abundante vulcanismo a la cual se asocia además el 90% de la sismicidad del planeta.

Como consecuencia de estos procesos regionales, los Andes norpatagónicos están catalogados por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica como región de *peligrosidad sísmica moderada*. Además, la zona está expuesta a recurrentes caídas de ceniza volcánica, formada por materiales expulsados a la atmósfera por las erupciones explosivas de volcanes ubicados en su mayoría en Chile. Los vientos dominantes del oeste transportan esas cenizas hacia territorio argentino, donde se produce normalmente la depositación de la mayor parte del material eruptivo. Cada caída de ceniza volcánica genera en superficie una capa de material que se deposita también en los lechos lacustres. Técnicamente, esas cenizas se llaman *tefras*.

Figura 1. Interacción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana que componen la capa externa sólida de la Tierra o litosfera. La primera se mueve lentamente hacia el este y se sumerge debajo de la segunda, que se desplaza hacia el oeste. El proceso se llama subducción y es parte de la teoría denominada tectónica de placas.



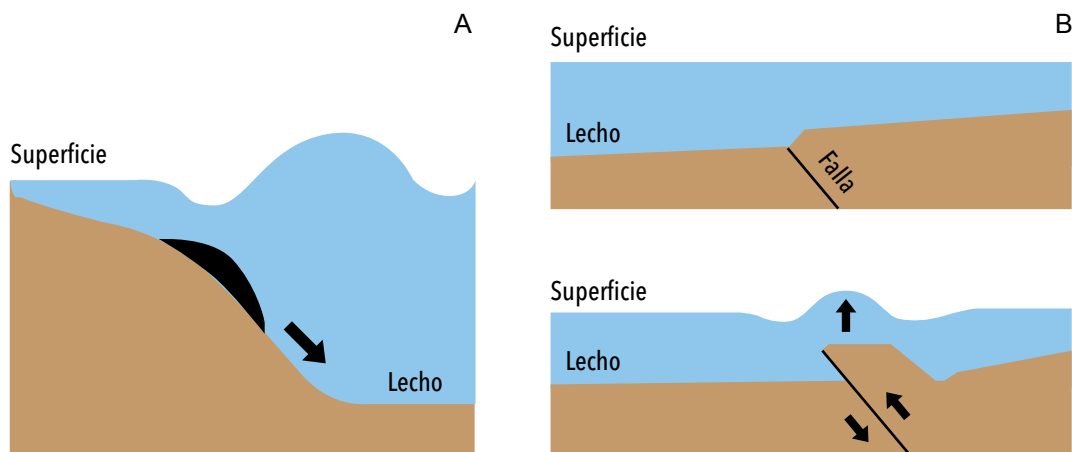


Figura 2. Generación de olas en la superficie de un lago por efecto de: (A) un deslizamiento de los sedimentos acumulados en una zona con pendiente de su lecho, y (B) desplazamiento de una falla en el lecho.

Aún vivimos las consecuencias de la erupción más reciente, iniciada el 4 de junio de 2011 en el Cordón Caulle. En los últimos cien años, cinco fenómenos de ese tipo afectaron el área de Bariloche: las caídas de ceniza de 1921-1922, 1960 y 2011-2012, provenientes de erupciones de dicho complejo volcánico, y las de 1961 y 2008-2009, causadas respectivamente por los volcanes Calbuco y Chaitén.

Esta situación geológica se ve reflejada en las características del relleno sedimentario y del relieve del lecho de los lagos de la región. Estudios realizados en el lago Nahuel Huapi revelaron bancos de tefra en diferentes profundidades. Su lecho, lo mismo que el de otros lagos de la región, muestra abundantes deslizamientos en los sectores costeros, especialmente en las proximidades de los sitios en que desembocan ríos y forman pequeños deltas.

Un deslizamiento es un proceso de remoción en masa donde el material se mantiene bastante coherente y se mueve sobre una superficie bien definida, que puede ser un plano aproximadamente paralelo a la pendiente o una superficie curva. Los desencadenantes de deslizamientos subacuáticos pueden ser varios, entre otros, un terremoto, una rápida depositación de sedimentos en ambientes deltaicos, la presencia de reservorios de gas en el fondo lacustre, la ocurrencia de olas de tormenta o el desarrollo de actividades antrópicas que desestabilicen las pendientes. Para el lago Nahuel Huapi, se ha encontrado una relación entre los movimientos sísmicos de magnitud registrados en la región y los movimientos en masa acaecidos en su lecho.

Conviene también señalar que los estratos de tefra del fondo lacustre están constituidos por material volcánico muy liviano y poco consolidado, que bajo la influencia de, por ejemplo, un sismo pueden adquirir el comportamiento de un fluido y dar lugar a extensos planos de deslizamiento.

El relieve del fondo lacustre se estudia con gran precisión recurriendo a un instrumento llamado *sonar batimétrico por medición de fase*, que permite reconstruir la topografía tridimensional del lecho mediante la emisión y detec-

ción de ondas acústicas. La aplicación de esa técnica, junto con el análisis de la composición y estructura interna de los sedimentos del fondo del lago, permitió identificar los procesos que en 1960 generaron un tsunami en el Nahuel Huapi.

## El tsunami de 1960

El término *tsunami* se ha ido imponiendo en reemplazo del antes habitual *maremoto*, o más precisamente *lagomoto* para el caso que nos ocupa. Se refiere a una ola o serie de olas que se producen en una masa de agua empujada violentamente por una fuerza que la desplaza en sentido vertical. Aunque la mayoría de los tsunamis acaecen en ambientes marinos, desde hace algunos años se ha prestado atención y comenzado a estudiar tsunamis lacustres, principalmente en Europa, con escasos estudios en la región patagónica.

Un tsunami se puede producir en un lago por diferentes causas. Además de los mencionados deslizamientos subacuáticos (figura 2), puede ser la consecuencia de la caída de grandes volúmenes de rocas en el cuerpo de agua, las erupciones volcánicas en sitios cercanos o la reactivación de fallas inactivas. Este tipo de fenómenos afecta la morfología del fondo lacustre y puede desplazar importantes masas de agua, así como inducir la formación de una o más olas en la superficie.

El 22 de mayo de 1960 ocurrió un tsunami en el lago Nahuel Huapi, simultáneo con un sismo de magnitud  $9,5M_{\text{w}}$  conocido como sismo de Valdivia, el mayor históricamente registrado. Como recuerdan antiguos pobladores —y fotografías de aquel día lo atestiguan—, grandes olas impactaron sobre las costas de la ciudad de Bariloche, en particular en la zona del antiguo muelle, frente al centro cívico. La consecuencia fue la destrucción de ese muelle, el hundimiento de un puñado de embarcaciones menores y la pérdida de dos vidas humanas.

Para comprender el proceso, los autores de esta nota estudiaron la morfología del lecho del lago en los alre-



dedores del puerto destruido y posteriormente reconstruido, así como las características de los sedimentos encontrados en diferentes sectores de la cuenca lacustre. También analizaron los estratos que forman el relleno sedimentario en la porción central del lago, frente a San Carlos de Bariloche. No encontraron evidencias de una reactivación de fallas en el lecho, pero sí pruebas de un gran deslizamiento ocurrido frente al puerto, por debajo de los 70m de profundidad. Los sedimentos movilizados produjeron depósitos característicos, identificables en varios sectores del lago. Por encima de ellos, apareció una capa de material piroclástico correspondiente a la ceniza caída días después de la erupción del Puyehue-Cordón Caulle sobrevinida en 1960.

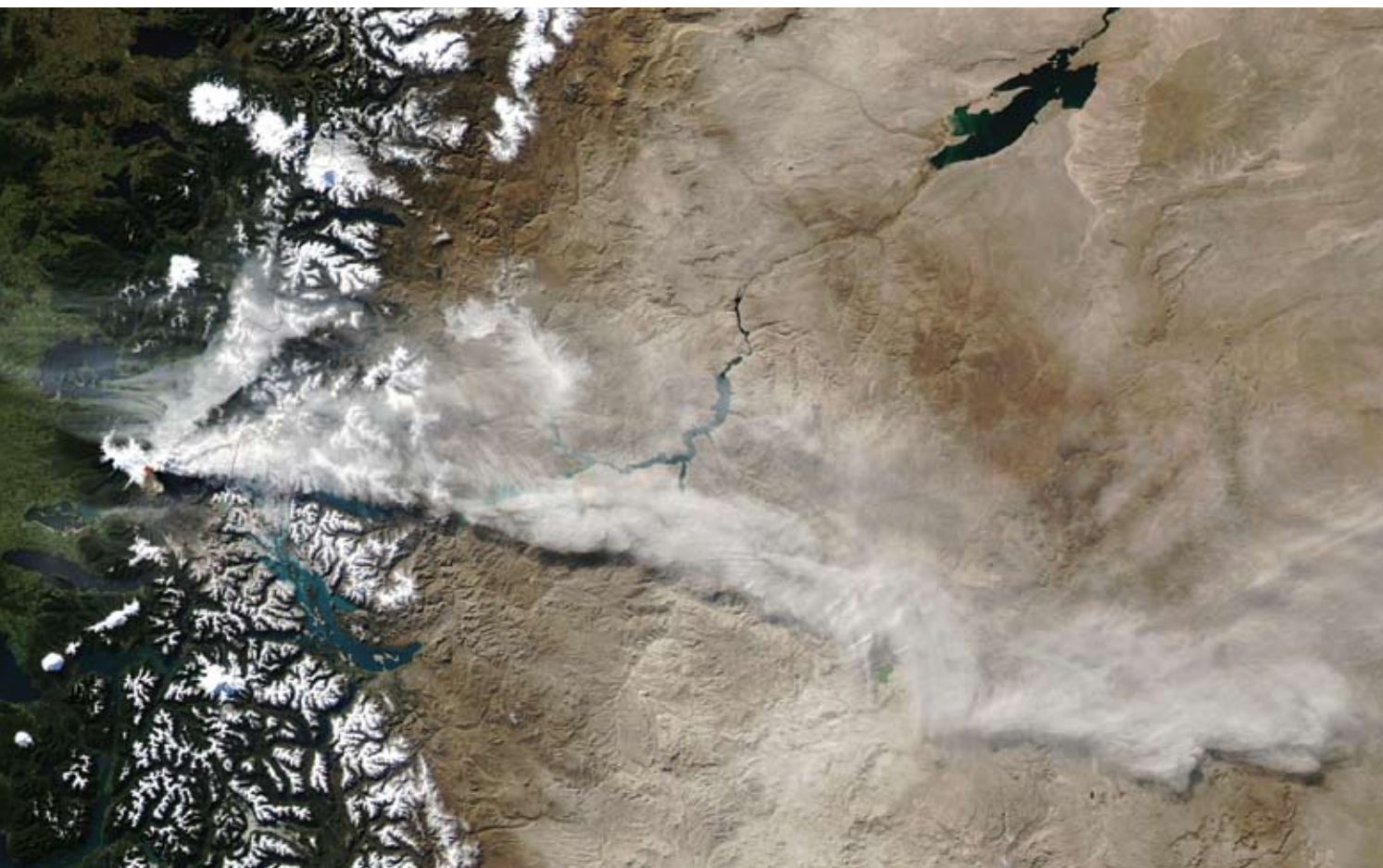
El hallazgo de esa capa de tefra permitió establecer una relación temporal entre el deslizamiento y el sismo de ese año. Se considera que el movimiento en masa ocurrido frente a Puerto San Carlos fue producto del impacto de las ondas sísmicas del terremoto de 1960 en el lecho lacustre y se vinculó con seguridad al tsunami registrado. En efecto, la movilización de estos grandes volúmenes de sedimentos en profundidad habría provocado el desplazamiento de una masa de agua y una ola tipo

tsunami que golpeó las costas de la ciudad de Bariloche. El colapso del antiguo muelle se puede atribuir a la probable ocurrencia de un flujo de detritos (un tipo de remoción en masa donde el material se desplaza pendiente abajo en forma canalizada, como un fluido viscoso) en los sedimentos sobre los que se asentaba el muelle. Esos sedimentos se habrían debilitado por las vibraciones que produjo el hincado de pilotes durante la reconstrucción del muelle, que había sufrido un incendio hacia fines de marzo de 1958. El tsunami ocurrió cuando la reconstrucción estaba prácticamente concluida, pero esa acción humana probablemente incrementó la inestabilidad de las pendientes del fondo lacustre en el área del puerto.

## La erupción del Puyehue-Cordón Caulle y sus consecuencias en el Nahuel Huapi

El 11 de julio de 2011, mientras se registraba actividad sísmica y volcánica en el Cordón Caulle, se advirtió una oscilación del nivel de las aguas en el puerto de Villa

Esta imagen satelital, tomada por el instrumento MODIS a bordo del satélite Aqua el 20 de junio de 2011 a las 18:50 UTC, muestra una débil pluma de cenizas proveniente del volcán Puyehue-Cordón Caulle. La pluma se desplaza hacia el sudeste y el área en marrón claro al sur de la misma posiblemente sea cenizas en el suelo de cuando la pluma soplabla encima de esa zona. Nótese los picos nevados de los Andes a la izquierda de la imagen. Foto NASA MODIS Rapid Response Team





Cenizas del volcán Puyehue en bosques de la zona de Bariloche. Foto G Villarosa

La Angostura. La combinación de un terremoto con ondas en la superficie del lago condujo a suponer que el segundo fenómeno habría sido consecuencia de los movimientos sísmicos, o bien de un movimiento de masa subacuático, a su vez desencadenado por estos pequeños sismos.

Surgió así inquietud acerca de las condiciones de estabilidad de las pendientes costeras en cercanías de dicha localidad, y con ella la necesidad de identificar y caracterizar movimientos en masa y áreas del lecho lacustre susceptibles a sufrir deslizamientos. En particular, se planteó la singular situación observada en las desembocaduras de los ríos que forman deltas, pues durante los meses de la erupción del Cordón Caulle se acumularon en estos ambientes importantes volúmenes de materiales volcánicos como consecuencia de la removilización de estos materiales a lo largo de las cuencas hídricas y hacia el lago Nahuel Huapi.

El enorme volumen de sedimentos que se deposita en su mayor parte en los frentes de los deltas provoca en poco tiempo un crecimiento significativo de estos bajo la forma de depósitos muy poco compactos, con gran contenido de agua y pendientes abruptas, lo que los hace especialmente susceptibles a sufrir deslizamientos.

Los autores estudiaron los deslizamientos subacuáticos y la dinámica de sedimentación de los materiales piroclásticos de la erupción del Puyehue-Cordón Caulle en los deltas de los arroyos Totoral, Pireco y Bonito, en las cercanías de Villa La Angostura; Ñireco, en las afueras de San Carlos de Bariloche, y Ñirihuau, en Dina Huapi, localidad cercana al nacimiento del río Limay. Para hacerlo, colocaron colectores de sedimentos en distintas

profundidades del lago y relevaron la morfología de la porción sumergida de los deltas.

También analizaron el crecimiento o la evolución de los deltas por efecto de la acumulación del material piroclástico movilizado por los ríos utilizando fotografías aéreas tomadas en marzo de 2008 y marzo de 2012, es decir, antes y después de la erupción volcánica en Chile. En ellas se advierte un notable crecimiento de la superficie expuesta de los deltas, sobre todo los de los arroyos Totoral y Pireco (unos 30.000m<sup>2</sup>), los más cercanos al volcán. Esta información concuerda con cálculos preliminares de las tasas de sedimentación en los deltas para los meses iniciales de 2012, cuyos valores crecieron significativamente con relación a los anteriores a la erupción obtenidos en varios lagos de la región, incluido el Nahuel Huapi.

En los frentes de delta se hallaron indicios de dos tipos de fenómenos de remoción en masa: deslizamientos y flujos de detritos. Estos últimos forman canales subacuáticos. En todos los frentes de delta se advierten evidencias de que esos fenómenos son recurrentes; alternan con superficies no afectadas por movimientos en masa. En los deltas correspondientes a las cuencas más alejadas del volcán, las de los arroyos Ñireco y Ñirihuau, la erupción no provocó cambios notables en cuanto a la ubicación o extensión de los movimientos en masa identificados, ni los hubo después de la erupción. En cambio, en los deltas correspondientes a las cuencas más cercanas al volcán, los de los arroyos Pireco y Totoral, los colectores de sedimentos indicaron muy altas tasas de sedimentación y registraron un fenómeno de flujo ocurrido entre

febrero y mayo de 2012, verificado a unos 80m de profundidad frente a la desembocadura del segundo de esos arroyos. El análisis del material colectado determinó que se trataba de sedimentos del delta que se desplazaron.

En los sectores de los deltas que no se desplazaron puede observarse la topografía anterior a los deslizamientos, conformada por una franja costera de escasa pendiente, seguida de las pendientes pronunciadas del frente del delta. Esas fuertes pendientes, así como las altas tasas de sedimentación halladas, favorecen que ocurran procesos de remoción en masa e incrementan la posibilidad de que sucedan en el futuro. Por ello, se considera que los sectores libres de movilizaciones en masa son especialmente propensos a sufrir una desestabilización, sobre todo si se tiene en cuenta la alta probabilidad de

que el sedimento depositado en esas áreas tenga características similares al de las áreas contiguas deslizadas.

A partir de estos análisis sedimentológicos y de los estudios de la topografía del lecho, los autores esperan poder reconocer los elementos que favorecen la ocurrencia de deslizamientos subacuáticos en el lago Nahuel Huapi, e identificar y caracterizar áreas potencialmente inestables de los deltas estudiados.

Este trabajo contó con el financiamiento del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, del Programa Científico-Tecnológico de Apoyo a la Emergencia por la Erupción del Volcán Puyehue-Cordón Caulle (proyectos N° 40-B-187 y 40-B-188), y de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2010-0636 y PICT 2010-2046).

## LECTURAS SUGERIDAS

**BARROS G**, 1961, *El maremoto del 22 de mayo de 1960 en las costas de Chile*, Departamento de Navegación e Hidrografía de la Armada de Chile, Santiago.

**PARSONS T**, 2002, *Enciclopedia histórica centenaria de Bariloche*, 3 de mayo de 1902-3 de mayo de 2002, t. 1, p. 150.

**VILLAROSA G et al.**, 2009, 'Origen del tsunami de mayo de 1960 en el lago Nahuel Huapi. Aplicación de técnicas batimétricas y sísmicas de alta resolución', *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65, 3: 593-597. Accesible en <http://www.scielo.org.ar/cgi-bin/wxis.exe/iah/>



### Débora Beigt

Doctora en geografía, Universidad Nacional del Sur.  
Investigadora asistente del Conicet en el Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente.  
[dbeigt@comahue-conicet.gob.ar](mailto:dbeigt@comahue-conicet.gob.ar)



### Gustavo Villarosa

Doctor en ciencias geológicas, UBA.  
Investigador adjunto del Conicet en el Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente.  
Profesor adjunto, Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue.  
[villarosag@comahue-conicet.gob.ar](mailto:villarosag@comahue-conicet.gob.ar)



### Valeria Outes

Licenciada en ciencias geológicas, UBA.  
Profesional principal del Conicet en el Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente.  
[outsv@comahue-conicet.gob.ar](mailto:outsv@comahue-conicet.gob.ar)



### M Andrea Dzendoletas

Magíster en gestión ambiental del desarrollo urbano, Universidad Nacional del Comahue.  
Profesional principal del Conicet en el Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente.  
[dzendoletasma@comahue-conicet.gob.ar](mailto:dzendoletasma@comahue-conicet.gob.ar)



### Eduardo A Gómez

Doctor en geología, Universidad Nacional del Sur.  
Profesor adjunto, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca.  
Investigador independiente del Conicet en el Instituto Argentino de Oceanografía.  
Vicedirector del Instituto Argentino de Oceanografía, Conicet-UNS.  
[gmgomez@criba.edu.ar](mailto:gmgomez@criba.edu.ar)