

# EL CASO DEL *OUTBURST FLOOD* HISTÓRICO DE LA LAGUNA DERRUMBE, CHOLILA, CHUBUT. COLAPSO DE DIQUE MORÉNICO EN LA CORDILLERA NORPATAGÓNICA

Bruno COLAVITTO<sup>1</sup>, Darío L. ORTS<sup>2</sup> y Andrés FOLGUERA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Cs. Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. E-mail: bcolavitto@gmail.com

<sup>2</sup>Instituto de Estudios Andinos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. República Argentina.

## RESUMEN

La laguna Derrumbe es un cuerpo de agua ubicado en los Andes Norpatagónicos en la provincia de Chubut, Argentina. Está contenida en un circo glaciar y endicada por una morena frontal del glaciar homónimo. A través del reconocimiento de campo se pudo describir a esta laguna y a un importante depósito rocoso que se halla aguas abajo de la misma, interpretado como un depósito de *outburst flood*. Estos depósitos son generados por procesos de alta energía relacionados con la rotura de un dique natural, en este caso un dique morénico. El estudio realizado permitió concluir que la morena frontal del glaciar Derrumbe sufrió una rotura parcial en tiempos históricos, desatando así una inundación súbita aguas abajo de la laguna, a través del valle del río Tigre, en la localidad de Cholila. En este trabajo se analizaron las posibles causas que dieron lugar a la rotura, la cual probablemente sea producto del rápido retroceso que el glaciar experimentó durante la década del '50 y principios del '60. Retroceso comparable con el ocurrido en muchos de los cuerpos glaciares de los Andes Patagónicos durante el último siglo.

**Palabras clave:** *cambio climático, Andes Patagónicos, remoción en masa, sismo.*

## ABSTRACT

*The historic outburst flood of the laguna Derrumbe, Cholila, Chubut. Fast glacier retreat and moraine dam failure in North Patagonian Cordillera.*

The Laguna Derrumbe is a body of water located in the North Patagonian Andes, in Chubut province, Argentina. This lake is contained in a glacial cirque and dammed by the terminal moraine of the namesake glacier. Through field survey it was possible to describe this lake and an important rocky deposit downstream of it, which is interpreted as an outburst flood deposit. These deposits are generated by high-energy processes related to the failure of a natural dam, in this case a moraine dam. The study made allowed to conclude that the frontal moraine of the Derrumbe glacier suffered a partial rupture in historic times, unleashing a flash flood downstream to the lake, through the Tigre river valley in the town of Cholila. In this work the possible causes that led to the failure are discussed, concluding that the main cause was probably the fast retreat that the glacier experimented in the 50's and early 60's, similarly to the general glacier retreat observed in the Patagonian Andes during the last century.

**Keywords:** *climate change, Patagonian Andes, mass wasting, earthquake.*

## INTRODUCCIÓN

En los Andes de la Argentina, las rupturas de diques naturales, asociadas a la inestabilidad de cuencas lacustres, han sido un proceso descrito desde los Andes Centrales hasta los Patagónicos, desde hace casi un siglo comenzando con los pioneros estudios de Groeber (1916) (ver para revisiones recientes, Hermanns *et al.* 2004, 2008, Penna *et al.* 2007, 2008, Kozłowski y Folguera 2009, Perucca y Esper 2009).

Los casos citados presentan variaciones relativas en los tiempos de estabilidad y en los desencadenantes potenciales de su inestabilidad pero poseen como denominador común al proceso de remoción en masa como agente del endicamiento.

En este trabajo se estudia un caso, no analizado previamente, donde el endicamiento fue provocado por depósitos correspondientes a una morena frontal. Si bien en la cordillera andina de la Argentina no se han descrito exhaustivamente estos fenó-

menos, la ruptura de diques naturales asociados a depósitos morénicos es un proceso conocido y ampliamente tratado (véase Costa y Schuster 1988). Las morenas en general se consideran geoformas inestables, muy susceptibles a su desestabilización y rotura debido a distintos factores, que van desde causales climáticas y actividad sísmica hasta procesos de erosión retrocedente, provocados potencialmente por variaciones en los niveles de base local, generalmente ligados a lagos intermontanos en los

que desembocan las aguas. Deslizamientos gravitacionales en las morenas también pueden constituir un factor de desestabilización del dique natural (Osti *et al.* 2011). La zona de estudio, correspondiente a las nacientes del río Tigre, se inscribe en el ámbito de los Andes Norpatagónicos (Fig. 1). Los procesos glaciarios pliocenos a cuaternarios han dejado en este sector una importante impronta en el relieve. Los abundantes valles en forma de U y lagos inscriptos en relieves montañosos, elongados en dirección E-O y algunos endicados por morenas frontales, son evidencias de este proceso. Aún hoy algunos glaciares alimentan muchos de los

grandes ríos que drenan este sector cordillerano (Fig. 2). Los glaciares Derrumbe y Tigre son afluentes del río Tigre, que a su vez es el principal afluente al lago Cholilla, desde el cual nacen las aguas del río Carrileufú en el noroeste de la provincia del Chubut (Fig. 1). En las nacientes del río Tigre, así como en las nacientes de algunos de sus arroyos tributarios, suelen encontrarse depósitos de morenas neoglaciaras, tanto frontales como laterales, los cuales son de vital importancia para el desarrollo de lagos proglaciarios (Porter y Denton 1967).

El presente trabajo surge a partir del reconocimiento de campo aguas arriba del río Ti-

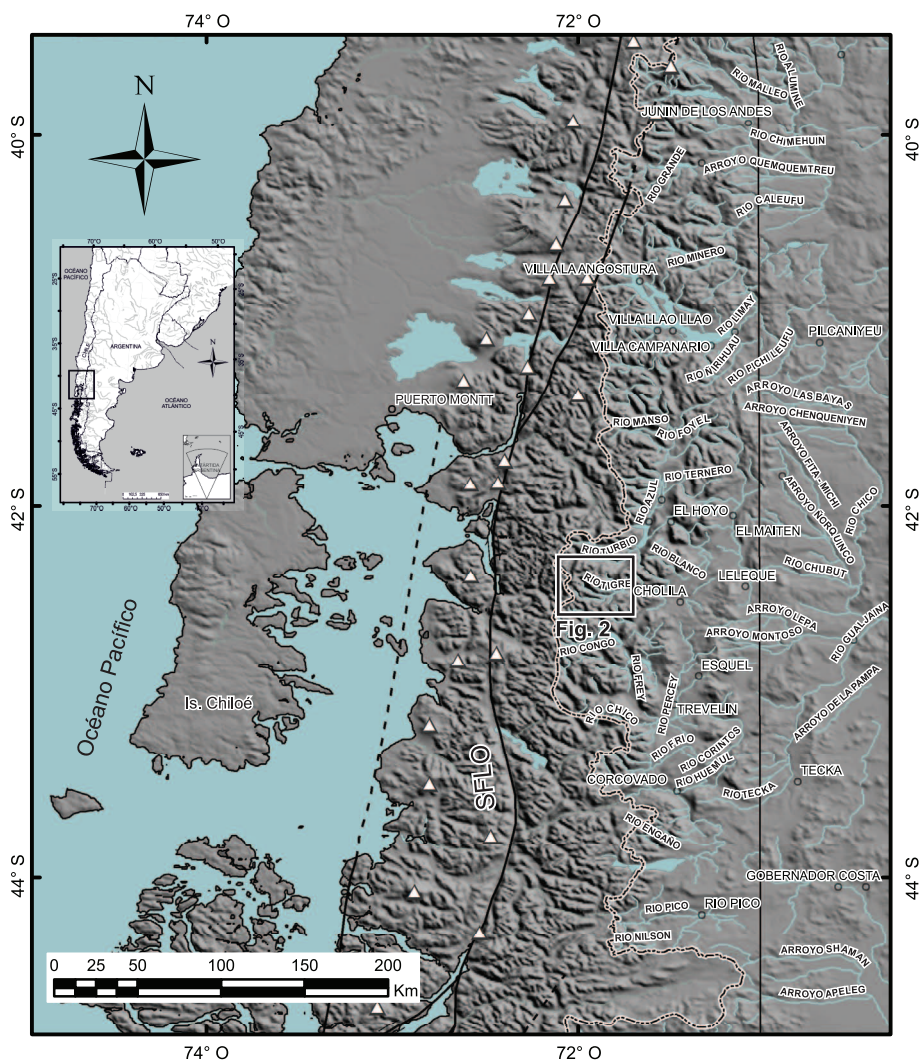
gre, hasta la laguna Derrumbe (laguna Triste para los locales), en sus nacientes. La misma se ubica a 50 km de la localidad de Cholilla, a los 42° 26' S y 72° O (Figs. 1 y 2). Este pequeño cuerpo de agua se aloja en vecindades al límite internacional con Chile y posee una superficie estimada en 0,45 km<sup>2</sup>. Aguas abajo de la laguna se observa un importante depósito de bloques con ápice hacia aguas arriba, de aproximadamente 0,38 km<sup>2</sup> de superficie, producto de la rotura del dique natural del lago, y el posterior vaciamiento parcial del mismo (Fig. 3). Esta morfología es interpretada aquí como un depósito de *Glacial Lake Outburst Flood* (GLOF), cuyo desencadenante será posteriormente discutido. La laguna es descripta inicialmente en un informe interno realizado por la Dirección General de Bosques y Parques del Chubut (2007) donde se menciona la rotura de la morena y el desagote parcial del cuerpo de agua, suponiendo al evento como histórico, pero sin asignarle una edad precisa.

Los *Glacial Lake Outburst Flood* son procesos que han sido estudiados desde la mitad del siglo pasado en todas partes del mundo. Se han hecho trabajos sobre GLOF históricos en las montañas del oeste norteamericano (p.ej. Blown y Church 1985), en el Himalaya (p.ej. Osti *et al.* 2011), en la Península Antártica (p.ej. Sone *et al.* 2007) y en los Andes (p.ej. Carey 2005). Además se han realizado modelados hidrológicos (p.ej. Balmforth *et al.* 2009) que apuntan a un mayor entendimiento acerca de los mecanismos por los que ceden estos diques naturales.

En la presente publicación se pretende describir el fenómeno mencionado, como un evento particular de la Cordillera Patagónica, analizar su potencial alcance y magnitud y circunscribirlo temporalmente. Finalmente se tratará de evaluar la potencial repetición de este proceso en el futuro en otras cuencas lacustres que reúnan características similares, ya que el actual rápido retroceso glaciario resulta el factor, al menos indirecto, de estas desestabilizaciones.

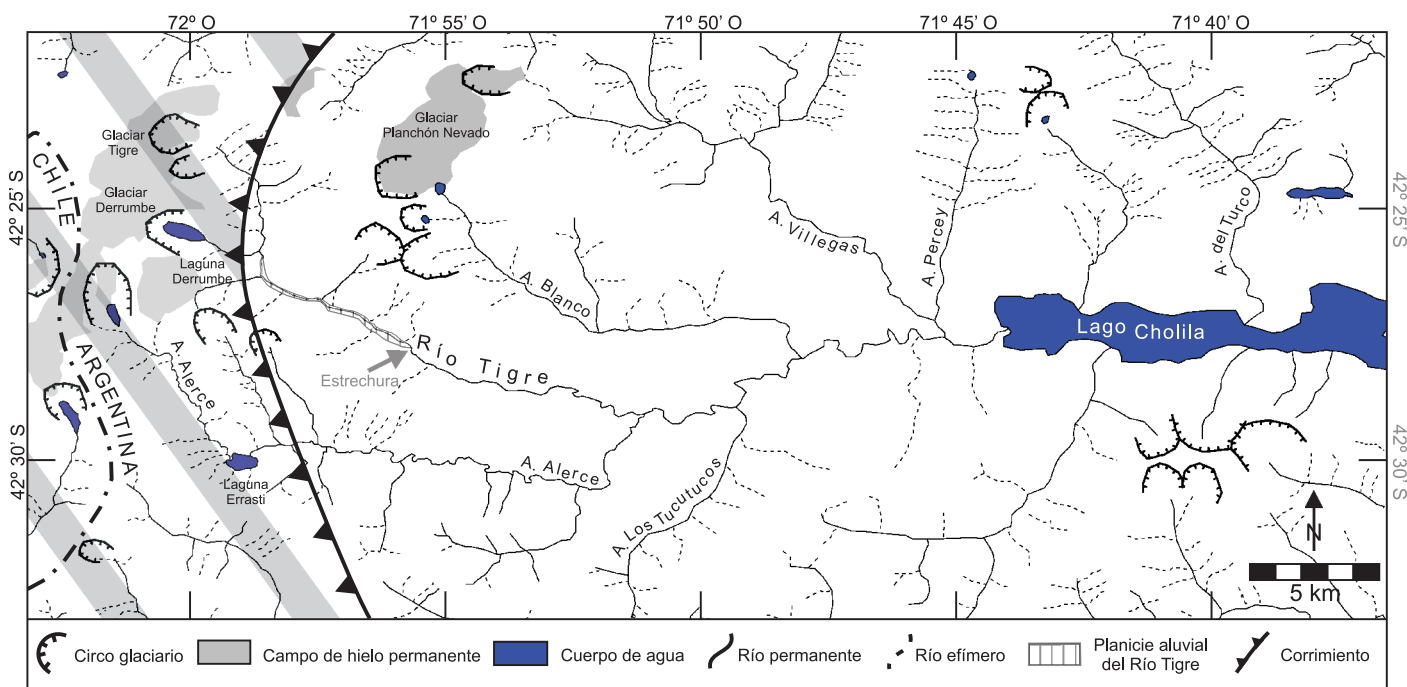
## GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se sitúa dentro de la Cordillera Norpatagónica, que define la divisoria de aguas con Chile. El basamento de la región está caracterizado por rocas metamór-



**Figura 1:** Ubicación del área de estudio en el ámbito de la Cordillera Norpatagónica. El recuadro corresponde al área que abarca el mapa de la figura 2. Se indica con trazas en negro el sistema de fallas LiQuiñe Ofqui (LOFZ por sus siglas en inglés) que concentra la actividad neotectónica y sismogénica cortical de este segmento andino. Además se señala con línea blanca y negra entrecortada el límite internacional argentino-chileno y los triángulos blancos representan la ubicación de volcanes activos.



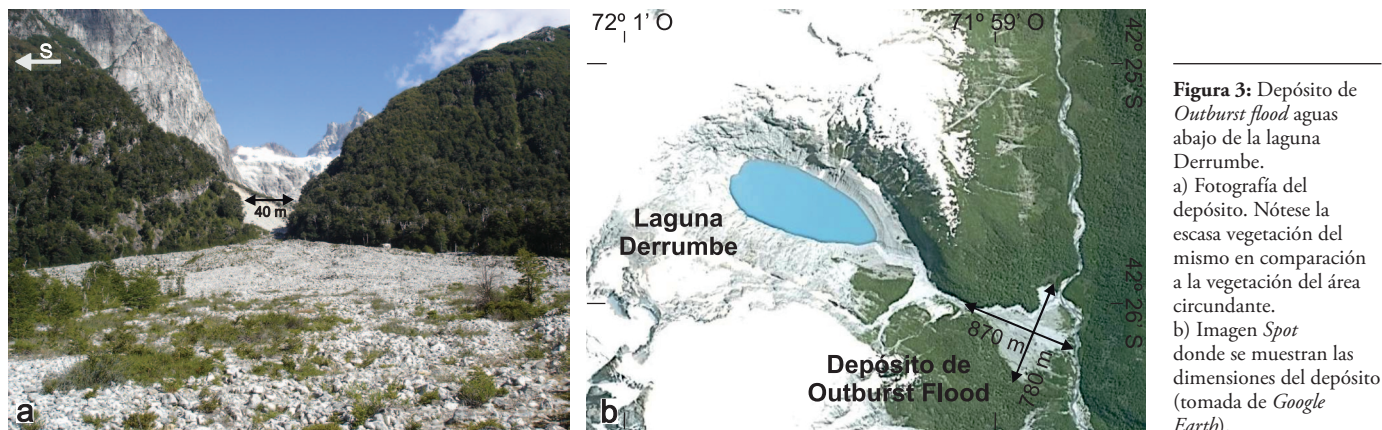


**Figura 2:** Cuenca glacifluvial del lago Cholila, en la cual el río Tigre, con una de sus nacientes en el glaciar Derrumbe, es uno de los principales afluentes. El Batolito Andino Patagónico en el sector occidental (rayado gris), compuesto por granitoides de edad cretácica en la región, es exhumado por un corrimiento frontal con vergencia oriental. Nótese también la extensión de la planicie del río Tigre hasta la estrechura señalada en el mapa con una flecha.

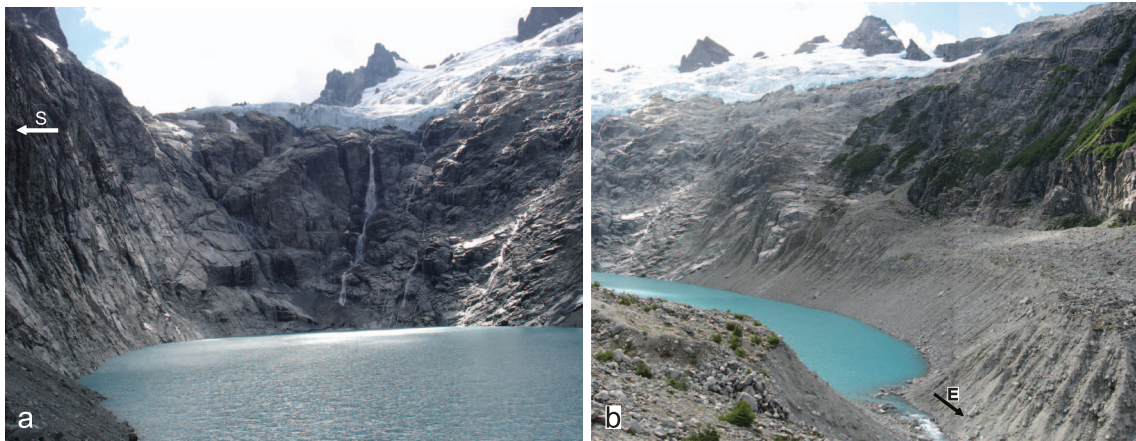
ficas neopaleozoicas que se exponen como colgajos dentro de los cuerpos graníticos mesozoicos a estas latitudes, sin conformar afloramientos continuos como lo hacen hacia el norte (González Bonorino 1979). Los mayores afloramientos de estos cuerpos graníticos se ubican en el sector limítrofe occidental y constituyen el Batolito Andino Patagónico, de edad cretácica a miocena, compuesto por tonalitas, granodioritas y granitos calcoalcalinos (ver para revisión Hervé *et al.* 2007). El batolito es exhumado por un importante corrimiento con vergencia oriental

en la zona interna cordillerana (Fig. 2). Estas rocas plutónicas conforman las vertientes orientales de los cordones montañosos sobre las que se desarrollan las cabeceras de los sistemas glaciares, tales como el circo glaciar de la laguna Derrumbe (Fig. 2). Aguas abajo a través del valle del río Tigre, más allá del corrimiento que expone las series intrusivas, comienzan a aflorar secuencias volcánicas de edad jurásica media a cretácica inferior, correspondientes a los Grupos Lonco Trapial y Divisadero, interrumpidas por la densa vegetación de la zona.

La topografía del área está íntimamente ligada a las litologías aflorantes, a la estructura que define su exposición variable y a los diferentes grados de la acción glacial plioceno-cuaternaria. Así, la estructura de este sector de la cordillera corresponde a una serie de bloques levantados mediante distintos sistemas de corrimientos, determinando cordones con orientación NE principalmente. Los valles de los ríos Tigre y arroyos Alerce y Blanco han sido labrados sin un control estructural aparente, cortando la estructura previa de la zona.



**Figura 3:** Depósito de *Outburst flood* aguas abajo de la laguna Derrumbe. a) Fotografía del depósito. Nótese la escasa vegetación del mismo en comparación a la vegetación del área circundante. b) Imagen *Spot* donde se muestran las dimensiones del depósito (tomada de *Google Earth*).



**Figura 4:** a) Glaciar colgado Derrumbe y en primer plano la laguna homónima. Nótese la intensa abrasión típica del hielo sobre las paredes de rocas graníticas de la laguna Derrumbe. b) Morena frontal que endica a los remanentes de la laguna Derrumbe, mostrando signos de incisión aguas abajo.

### LA LAGUNA DERRUMBE Y EL DEPÓSITO DE *OUTBURST FLOOD*

La laguna Derrumbe se encuentra confinada a un circo glaciario, con paredes de roca de importante pendiente (Fig. 4a). Está limitada en su borde SSE por una morena frontal del ya retirado, y hoy colgante, glaciar Derrumbe. Esta morena tiene aproximadamente 20 m de altura y muestra una abertura importante (trinchera) de unos 30 m en su parte más alta y 4 m en su base (Fig. 4b). La trinchera es atravesada por un canal de *overflow* (Costa y Schuster 1988) que recorre el depósito de *outburst flood* aguas abajo, para luego desembocar en el río Tigre. El drenaje de la laguna se da principalmente por este canal y, adicionalmente, por infiltración directa a través del dique morénico, mientras que la recarga es a través de deshielo proveniente del glaciar colgante y, eventualmente, caída directa de hielo (Fig. 4a).

Aguas abajo de la laguna se ubica el depósito de *outburst flood*. El mismo está constituido por clastos de rocas graníticas, principalmente tonalitas y granitos del Batolito Andino Patagónico, que varían entre tamaño bloque, con algunos clastos que alcanzan un diámetro medio de aproximadamente 1,5 m, y arena media a gruesa. La selección del depósito es mala y los clastos son angulosos a subangulosos (Fig. 5). El área ocupada por el depósito marca una interrupción violenta de la vegetación del área, encontrándose entre los clastos, y sobre los mismos, numerosos troncos y ramas fracturados, que evidencian la acción de un flujo de alta energía y la relativa juventud del mismo. Las laderas de los cerros circundantes muestran además

signos de activa e intensa erosión, como suelos arrancados. Cabe mencionar que sobre el depósito se puede apreciar el crecimiento de algunos ñires y lengas (Fig. 3a), con ejemplares que alcanzan portes de hasta unos pocos metros. Esto indica en principio que se trata de un depósito relativamente joven, de unas pocas decenas de años, en proceso de colonización por parte de la vegetación.

Aguas abajo, el depósito de *outburst flood* se extiende potencialmente hasta la “estrechura” del río Tigre, unos 6 km lineales desde su ápice (Fig. 2). Esta suposición se basa en el desarrollo desproporcionado de la planicie aluvial hasta ese punto, el alto tamaño relativo de los clastos y su composición predominantemente monolitológica, asociada a granitoides, sin la presencia de volcánicas, el tipo litológico circundante aguas abajo.

### Determinación temporal del fenómeno y potencial magnitud

A partir del relevamiento de campo, que incluyó la toma de fotografías y una descripción geomorfológica de la laguna, la morena y el depósito asociado, se procedió a la búsqueda de fotografías aéreas que permitieran determinar y/o acotar la edad relativa de este evento, ya que a través de indicadores indirectos se lo presupone histórico (ver secciones anteriores). Se encontraron en el Departamento de Fotogrametría del SEGEMAR, fotografías aéreas tomadas en 1952 por el IGM (Fig. 6a). Estas imágenes forman parte de los fotogramas más antiguos registrados en nuestro territorio. Las mismas muestran que para aquel año el glaciar aún no se había retirado, no existiendo por ende una laguna. El cuerpo de hielo,

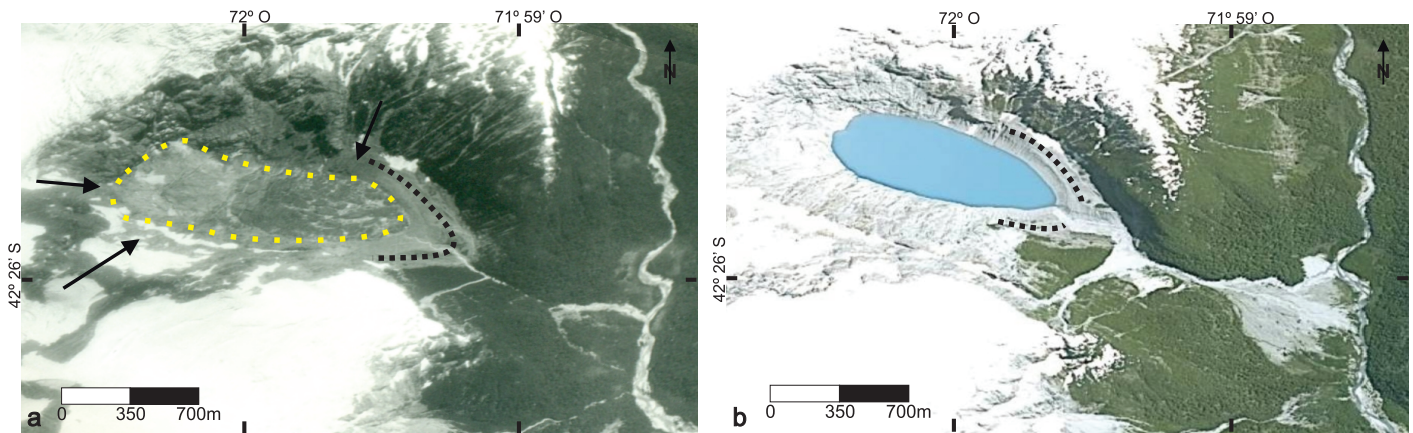
además, presentaba una densa cobertura de detritos. En estos fotogramas no hay evidencias del aluvión que dio origen al depósito de *outburst flood*, pudiéndose determinar así una edad máxima para el evento. Por otra parte, un informe del Centro Cultural Argentino de Montaña (ver referencias), correspondiente a una expedición de montañistas que visitaron la zona en enero de 1964, da cuenta de la existencia de este depósito para dicho año y aporta fotografías de la laguna Derrumbe o laguna Triste (Fig. 7). Allí se observa que el depósito y morfologías proximales guardan una estrecha relación con aquellas actualmente descriptas. De esta forma se pudo acotar el evento de rotura de la morena entre los años 1952 y principios de 1964.

En función de esta incerteza en un período de 12 años, se colectaron testimonios de habitantes de la zona que han arrojado datos interesantes con miras a caracterizar mejor el



**Figura 5:** Depósito de *outburst flood*. Nótese el tamaño que alcanzan algunos de los bloques correspondientes al Batolito Andino Patagónico.





**Figura 6:** Laguna Derrumbe y el río Tigre (con dirección N-S). a) Fotografía aérea tomada en 1952. En la misma se observa con línea punteada amarilla el glaciar negro que ocupaba el circo, y con línea punteada negra la morena frontal de dicho glaciar. Además se indican con flechas las vías de alimentación. b) Imagen de la laguna tomada de *Google Earth*, con fecha 2009. En la misma se observa la morena frontal abierta y, aguas abajo de la laguna, el depósito de *outburst flood*.

fenómeno en cuestión. Una entrevista realizada a Aldo Gerez y Raúl Sarsa, dos propietarios de tierras de la zona, arrojó detalles adicionales sobre el evento de *outburst flood* y potencial crecida asociada aguas abajo. Ellos dieron cuenta que hacia fines de la década del '50 ya existía la laguna y el depósito rocoso producto del *outburst flood*. Adicionalmente, Aldo Gerez informó que en ese lugar existía un alerzal de gran extensión que quedó enteramente sepultado por las rocas. Por otra parte, Ariel Suarez, habitante de Cholila y guía turístico en el río Tigre, mencionó lo siguiente: “*la gente que vivió entre el '50 y el '60 habla de una gran inundación, como si se hubiera taponado el río y luego reventado, escuchándose un estruendo. Los pobladores cuentan también que murieron animales e incluso algunos se encontraron colgando de los árboles*”.

Debido a la escasa población e infraestructura existente en el área en aquella época, los daños sufridos fueron bajos. Sin embargo, es importante destacar que procesos de estas magnitudes pueden constituir riesgos importantes para los pobladores y las actividades económicas locales, ubicadas aguas abajo, dado el actual nivel de desarrollo estival del valle del río Tigre y la población de Cholila.

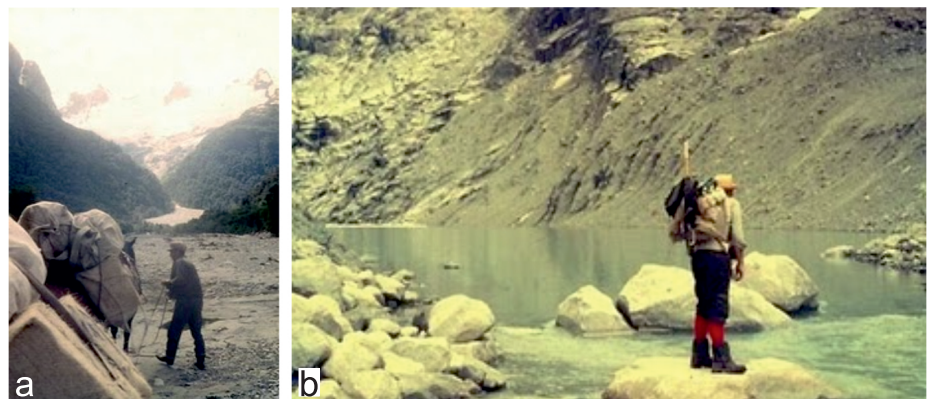
#### POSIBLES DESENCADENANTES CLIMÁTICOS Y SISMOLÓGICOS

La Cordillera Norpatagónica posee alturas relativamente bajas respecto a las observadas en los Andes Centrales hacia el nor-

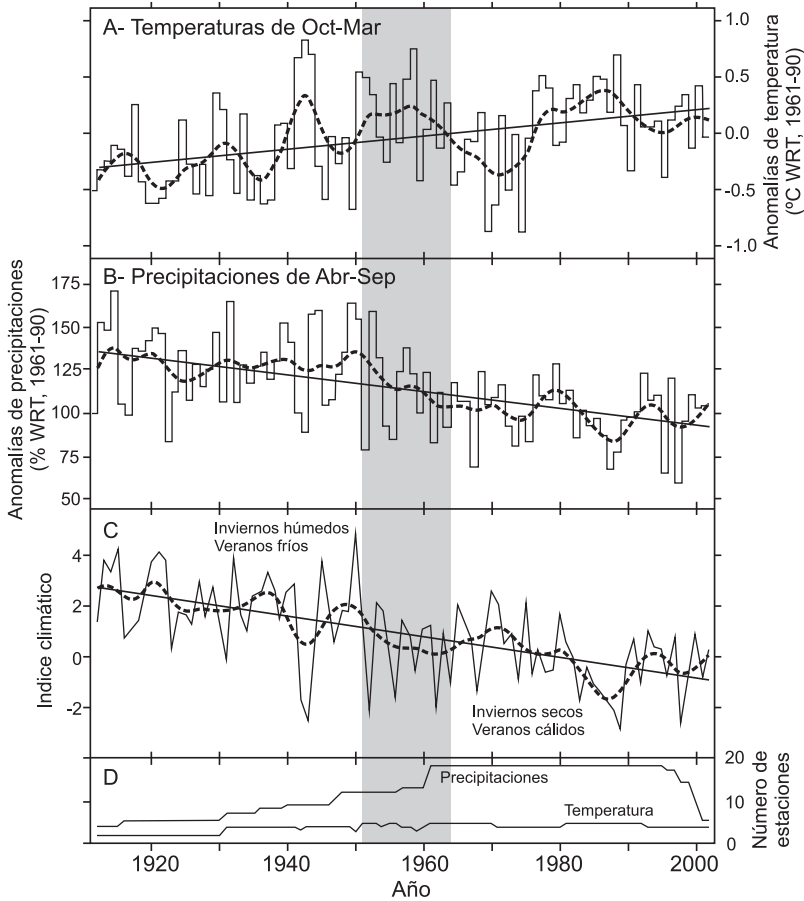
te, con un promedio inferior a los 2500 m.s.n.m. Aun así, este sector cordillerano juega un papel fundamental como barrera orográfica, frenando el ingreso de masas de aire desde el océano Pacífico. A estas latitudes las precipitaciones más fuertes se dan en la Cordillera Principal y su intensidad decrece hacia el este. Ésto, sumado a las temperaturas promedio de invierno y verano, entre 2° - 4°C y 14° - 18°C respectivamente, otorgan a este sector de la Cordillera de los Andes un clima templado, que hace que, hoy en día, los glaciares se restrinjan a los sectores montañosos más elevados (Masiokas *et al.* 2008).

Masiokas *et al.* (2008) analizan el comportamiento de los glaciares de estas zonas durante los últimos siglos, principalmente en vinculación al cambio climático. Particular

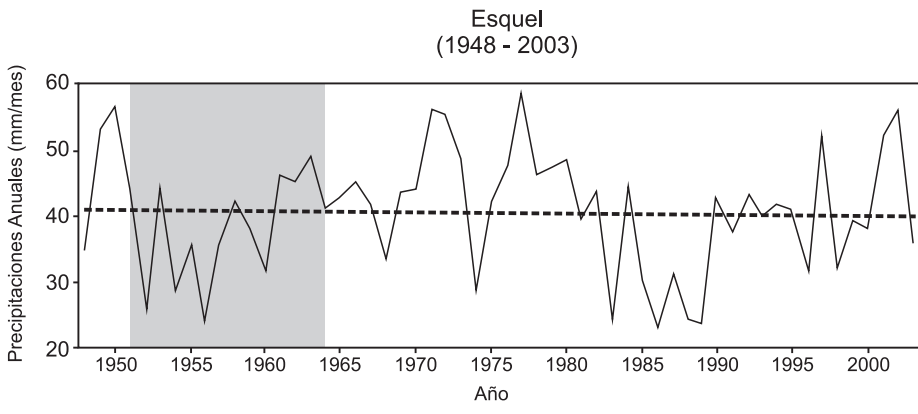
atención se le brinda a la Pequeña Edad Glaciar, o LIA por sus siglas en inglés, definida como un período frío durante el cual ocurrieron diversos avances glaciares en los siglos XV y XIX y algunos avances menores en el siglo XX. Este fenómeno se estudió en sectores de la Cordillera Central por Espizúa y Pitte (2009), y en la Cordillera Patagónica por Rabassa *et al.* (1978), Rabassa (2010) y Masiokas *et al.* (2010) entre otros, quienes han realizado dataciones de morenas y aplicado técnicas de dendrocronología a fin de determinar el alcance relativo de estos avances. Estas variaciones de los frentes glaciares se creen vinculadas con la actividad solar y con el efecto de las manchas solares en el clima del globo terrestre. Al culminar la última de estas neoglaciaciones, alrededor del año 1850, se da un



**Figura 7:** Fotografías tomadas por el grupo Dinos durante su expedición en enero de 1964. a) Se observa al fondo la temprana existencia del depósito analizado. b) Uno de los exploradores en la desembocadura de la laguna Derrumbe, en la zona de incisión de la morena frontal.



**Figura 8:** (A) Variaciones de temperatura para las estaciones cálidas (Octubre – Marzo) entre 1912 y 2002, referidas a un período de referencia entre 1961 y 1990. (B) Variaciones de precipitaciones para las estaciones frías (Abril – Septiembre) convertidas a porcentaje a partir de la media para el período 1961 – 1990. (C) Índice climático regional calculado a partir de la diferencia estandarizada entre las anomalías para las precipitaciones de las estaciones frías y las temperaturas medias de las estaciones cálidas. En general valores positivos son interpretados como el resultado de inviernos húmedos seguidos por veranos fríos y viceversa. (D) Número de estaciones que contribuyeron a las series de temperatura y precipitación dadas para cada año. Modificado de Masiokas *et al.* (2008). En sombreado gris se observa el período de tiempo estudiado.

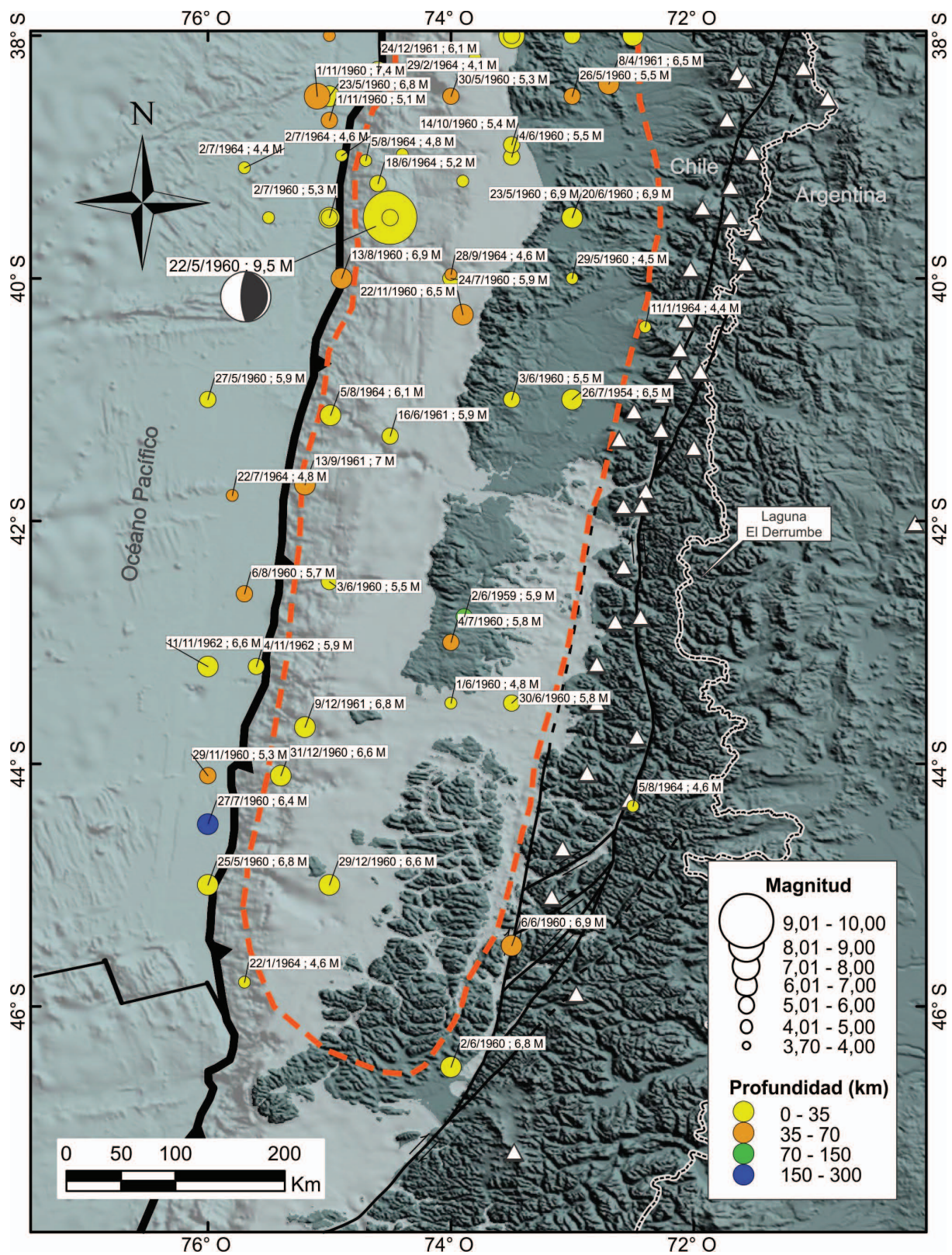


**Figura 9:** Serie de promedios anuales (mm mes<sup>-1</sup>) y tendencia lineal para la precipitación en Esquel. Modificado de Fundación e Instituto Torcuato Di Tella (2006). El sombreado indica el intervalo durante el cual se produjo el evento.

aumento de la temperatura global de 0,5° a 0,7°C y se observa que los glaciares comienzan a retroceder. En el hemisferio sur, y en particular en la Cordillera Patagónica, casi todos los glaciares muestran un importante retroceso (véase Masiokas *et al.* 2008 para una revisión al respecto) exceptuando quizás al glaciar Spegazzini y al Perito Moreno (Fundación e Instituto Torcuato Di Tella 2006). Este retroceso es consecuencia de desequilibrios en el balance entre las precipitaciones y las temperaturas del área. En la figura 8 se observa un gráfico modificado de Masiokas *et al.* (2008), donde se pueden ver las variaciones de temperaturas para los meses fríos, de la región andina del noroeste de la Patagonia entre 1912 y 2002. Así se formula un indicador con el fin de contrastar las relaciones entre las precipitaciones de invierno y las temperaturas de verano (Fig. 8c). Valores negativos para este índice contribuirían al retroceso de los glaciares. Si se pone atención al período 1951 – 1964, existe una tendencia por debajo de la media en la curva del índice climático. Para respaldar esta información se obtuvieron datos de precipitaciones de la estación de Esquel, cercana al área de estudio (Fundación e Instituto Torcuato Di Tella 2006). Estos datos muestran un comportamiento similar para las precipitaciones del período 1951 – 1964 (Fig. 9).

Otro aspecto se vincula con las características sismológicas de la región, que pueden constituir un factor clave para el desencadenamiento de este tipo de procesos. Si bien la sismicidad, tanto cortical como de interplaca, localizada desde el sector limítrofe hacia el retroarco donde se inscribe el área de estudio, es relativamente escasa, es en este segmento donde se han desarrollado dos de los más grandes terremotos de los siete mayores registrados en el período sismológico instrumental. Éstos han estado asociados a grandes zonas de ruptura en la interfase de las placas de Nazca y Sudamericana, liberándose aquí precisamente la cuarta parte de la energía sísmica global (Fig. 10) (Barrientos y Ward 1990, Wang *et al.* 2007, Ruegg *et al.* 2009, Moreno *et al.* 2009). En la figura 10 se muestran los sismos que han sido registrados durante el período 1952 – 1964, cuyos epicentros han





**Figura 10:** Actividad sísmica entre los años 1952-1964 en el segmento del margen continental aledaño a la laguna en cuestión. Resultados obtenidos de la base de datos sísmológica global de la USGS (Askew y Algermissen 1985). Nótese en línea punteada la zona de ruptura del terremoto de Valdivia del 22 de mayo de 1960 (Moreno et al. 2009). Los triángulos blancos hacen referencia a volcanes activos.

sido obtenidos de una compilación de datos del USGS *Earthquake Hazards Program* para el Proyecto SISRA (Askew y Algermissen 1985). En este período han ocurrido eventos de variada magnitud y profundidad, entre los cuales se destaca el gran terremoto de Valdivia con una zona de ruptura cercana a los 1000 km. de longitud. Este evento ocurrió el 22 de mayo de 1960 y tuvo una magnitud de Mw 9.5. El mismo se ha asociado al desarrollo de deslizamientos subácuos registrados como depósitos de corrientes de turbidez en los Lagos Nahuel Huapí, Puyehue y submarinos en el fiordo de Reloncaví, así como numerosos deslizamientos subaéreos de variada magnitud (Chapron *et al.* 2006).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Uno de los mecanismos más comunes a través de los cuales ceden los diques naturales, y en particular aquellos formados por morenas glaciares, está relacionado al desborde del lago, que puede ser inducido por el oleaje (Costa y Schuster 1988). Debido a las características particulares de la laguna Derrumbe y el ambiente en el cual está enmarcada, un aumento repentino del nivel del lago y consecuente producción de oleaje podría ser producido por la caída de grandes cantidades de roca, hielo o nieve en el cuerpo de agua. Esto generaría una ola que, excepcionalmente, sobrepasara la altura de la morena, actuando de forma tal que se eleve el poder erosivo del flujo en el canal de desembocadura (Costa y Schuster 1988). Este tipo de mecanismo erosivo ha sido modelado por Balmforth *et al.* (2009) con resultados favorables para el proceso mencionado. Es importante considerar que la laguna Derrumbe se encuentra confinada a taludes rocosos de pendientes muy abruptas, de más de 50°. Estas pendientes no permiten que se desarrollen procesos gravitacionales importantes, puesto que no da lugar a la acumulación de detritos, como de nieve o hielo. Por lo tanto, los deslizamientos asociados a la removilización de material desde estos taludes, no serían una de las causas más probables para disparar la ruptura del dique en este tipo de lago (Osti *et al.* 2011). Sin embargo, observando la ubicación actual del glaciar Derrumbe, se ve

que fragmentos frontales de éste sí podrían constituir un potencial gatillo para desencadenar un evento tipo GLOF. La caída de bloques de hielo, desde la altura a la cual se encuentra el cuerpo glaciar hoy, podría generar una serie de olas de altura suficiente como para producir el desborde del lago, y ello derivar en una rápida erosión en el canal de desembocadura y la descarga súbita del agua contenida (Lliboutry *et al.* 1977). Aun así, si se piensa en la posibilidad anterior, el punto clave es el retroceso de la lengua glaciar y el origen del lago en las últimas décadas. Por ello las condiciones meteorológicas particulares que se detallaron para el período investigado resultan clave. Si se compara las fotografías aéreas de 1952 (Fig. 6a) con aquellas tomadas por el Grupo Dinos (Fig. 7), se observa que en 12 años el glaciar retrocedió más de 800 metros. Este rápido retroceso del frente de hielo genera un exceso de agua, que incluso puede ocasionar el desborde del lago y activar los procesos erosivos mencionados anteriormente. Este mecanismo es el que pudo haber tenido lugar en el lago Témpanos en Río Negro (Rabassa *et al.* 1978) donde, durante la década del '40, un retroceso de 350 m del glaciar Frías también generó mayor derretimiento de agua y la ruptura de la morena que contenía al lago. Además, eventos GLOF en la Antártida y en la Patagonia (Sone *et al.* 2007; Dussailant *et al.* 2009) han sido estudiados y atribuidos indirecta o directamente al rápido retroceso que muestran los glaciares a estas latitudes. Entonces se pueden considerar los rangos de variación de las temperaturas y precipitaciones que se muestran en las figuras 8 y 9, junto con el constatado marcado retroceso del glaciar Derrumbe, como el factor clave asociado al posterior desagote del lago frontal.

En cuanto a las condiciones sísmicas de la zona y en particular del gran sismo de Valdivia de 1960, queda claro que las mismas pudieron influir directa o indirectamente en la ruptura, ya sea provocando derrumbes del glaciar superior o, eventualmente, produciendo deslizamientos tanto de la dera (Chapron *et al.* 2006) como sobre la morena (Osti *et al.* 2011). Gran parte de los sismos ocurridos en el período 1952 – 1964 (Fig. 10) tendrían la magnitud sufi-

ciente como para desequilibrar la morena contenedora, o bien para generar la caída de hielo o roca desde los sectores más elevados del circo.

Por último, queda por indicar que la planicie aluvial del río Tigre, que se extiende desde el depósito estudiado hasta la denominada estrechura, podría representar la proyección aguas abajo del *outburst flood*. Esta posibilidad se asienta en su carácter monolítico, correspondiente a clastos del Batolito Andino Patagónico, lo cual indica una fuente en la cordillera alta hacia el oeste, sin presencia de detritos provenientes de los tributarios circundantes enmarcados en rocas volcánicas mesozoicas (Fig. 2). La dilucidación de esta posibilidad es vital para la determinación del alcance del GLOF en cuestión, ya que podría haber alcanzado la estrechura del río Tigre (Fig. 2). Adicionalmente, las fotografías aéreas de 1952 muestran que esta planicie aluvial ya poseía dimensiones similares a las actuales, lo cual plantea una segunda hipótesis relativa a una posible recurrencia de este fenómeno en la región. Futuras investigaciones deberían analizar pormenorizadamente este punto.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente la lectura crítica de la Dra. Stella Moreiras que permitió mejorar este artículo. A Defensa Civil de Epuyén, en especial a Sandra Saldarini, por el apoyo logístico. Al Centro Cultural Argentino de Montaña y a Aldo Gerez, Raúl Sarsa y Ariel Suarez por los datos y testimonios aportados para este trabajo. El presente trabajo es la contribución R-74 del Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (UBA-CONICET).

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Askew, B.L. y Algermissen, S.T. 1985. Catalog of Earthquakes for South America: Hypocenter and Intensity Data. V. 4, 6, 7a, 7b, y 7c. Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), Lima, Perú.
- Balmforth, N. J., von Hardenberg, J. y Zammatt, R. J. 2009. Dam breaking seiches. *Journal of Fluid Mechanics* 628: 1-21.
- Barrientos, S. E. y Ward, S. N. 1990. The 1960



- earthquake: Inversion from slip distribution from surface deformation. *Geophysical Journal International* 103: 589-598.
- Blown, I. y Church, M. 1985. Catastrophic lake drainage within the Homathko River basin, British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal* 22: 551-563.
- Carey, M. 2005. Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Perú. *Global and Planetary Change* 47:122-134.
- Centro Cultural Argentino de Montaña. Portal oficial: [www.culturademontania.com.ar](http://www.culturademontania.com.ar). Relatos y fotos de Carlos Rey, Grupo Dinos.
- Chapron E., Ariztegui, D., Mulsow, S., Villarosa, G., Pino, M., Outes, V., Charlet, F. y Juvignié, E. 2006. Impact of 1960 major subduction earthquake in Northern Patagonia (Chile, Argentina). *Quaternary International* 158: 58-71.
- Costa, J. E. y Schuster, R. L. 1988. The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin* 100: 1054-1068.
- Dirección General de Bosques y Parques del Chubut. 2007. Solicitud de reserva de tierras a favor de la DGByP, cuenca Río Tigre, corredor Norpatagónico. Subsecretaría de Recursos Naturales, Ministerio de Industria, Agricultura y Ganadería (inédito), 68 p., Chubut.
- Dussaillant, A., Benito, G., Buytaert, W., Carling, P., Meier, C. y Espinoza, F. 2009. Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard? *Natural Hazards* 54: 469-481.
- Espizúa, L. E. y Pitte, P. 2009. The Little Ice Age glacier advance in the Central Andes (35°S), Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 345-350.
- Fundación Torcuato Di Tella e Instituto Torcuato Di Tella. 2006. Comunicación nacional de cambio climático: vulnerabilidad de la Patagonia y sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa. 369p.
- González Bonorino, F. 1979. Esquema de la evolución geológica de la Cordillera Norpatagónica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 34: 184-202.
- Groeber, P. 1916. Informe sobre las causas que han producido las crecientes del río Colorado (Territorios de Neuquén y La Pampa) en 1914. Dirección General de Minas, Geología e Hidrogeología Boletín 11 (Serie B Geología): 1-29, Buenos Aires.
- Hermanns, R.L., Naumann, R. y Folguera, A. 2004. Facies analyses of the outburst flood deposits along the Barrancas and Colorado rivers related to the catastrophic event of December 29, 1914 (northern Patagonia, Argentina). 9<sup>o</sup> International Symposium on Landslides.
- Hermanns, R., Fauqué, L., Fidel, L., Welkner, D., Folguera, A., Cazas, A. y Núñez, H. 2008. Overview of catastrophic megalandslides in the Andes of Argentina, Bolivia, Chile, Ecuador and Perú. *First World Landslide Forum. Actas*: 255-258.
- Hervé, F., Pankhurst, R., Fanning, C., Calderón, M. y Yaxley, G. 2007. The South Patagonian batholiths: 150 my of granite magmatism on a plate margin. *Lithos* 97: 373-394.
- Kozłowski, E. y Folguera, A. 2009. Primer registro histórico de una avalancha de rocas en los Andes argentinos. Región de la Laguna Baya en los Andes mendocinos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 227-229.
- Lliboutry, L., Arano, B.M., Pautre, A., y Schencler, B. 1977. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. *Journal of Glaciology* 18: 239-254.
- Masiokas, M.H., Villalba, R., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S. y Stepanek, P. 2008. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change* 60: 85-100.
- Masiokas, M.H., Luckman, B.H., Villalba, R., Ripalta A. y Rabassa, J. 2010. Little Ice Age fluctuations of Glaciar Río Manso in the north Patagonian Andes of Argentina. *Quaternary Research* 73: 96-106.
- Moreno, M. S., Bolte, J., Klotz, J. y Melnick, D. 2009. Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: Application to the 1960 Chile earthquake. *Geophysical Research Letters* 36: L16310.
- Osti, R., Bhattarai, T.N. y Miyake, K. 2011. Causes of catastrophic failure of Tam Pokhari moraine dam in the Mt. Everest region. *Natural Hazards* 58: 1209-1223.
- Penna, I., Hermanns, R. y Folguera, A. 2007. Determinación del área inmediata afectada por el desagote de la laguna Navarrete, Provincia de Neuquén (36°30'S-71°O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62: 460-466.
- Penna, I. M., Folguera, A. y Hermanns, R. L. 2008. Remoción en masa, cuencas lacustres asociadas y eventual colapso en el orógeno andino entre los 36°-38°S: Los casos Navarrete y Carrilauquen. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63: 172-180.
- Perucca, L. y Esper, Y. 2009. El deslizamiento de rocas y detritos sobre el río Santa Cruz y el aluvión resultante por el colapso del dique natural, Andes Centrales de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 571-585.
- Porter, S.C. y Denton, J.H. 1967. Chronology of neoglaciation in the North American Cordillera. *American Journal of Science* 265: 177-210.
- Rabassa, J. 2010. El cambio climático global en la Patagonia desde el viaje de Charles Darwin hasta nuestros días. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67: 139-156.
- Rabassa, J., Rubulis, S. y Suarez, J. 1978. Los glaciares del Monte Tronador, Parque Nacional Nahuel Huapi, Río Negro, Argentina. *Anales de Parques Nacionales* 14: 261-316, Buenos Aires.
- Ruegg, J., Rudloff, A., Vigny, C., Madariaga, R., Chabaliér, J., Campos, J., Kausel, E., Barrientos, S. y Dimitrov, D. 2009. Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción Chile. *Physics of the Earth and Planetary interiors* 175: 78-85.
- Sone, T., Fukui, K., Strelin, J.A., Torielli, C.A. y Mori, J. 2007. Glacier lake outburst flood on James Ross Island, Antarctic Peninsula region. *Polish Polar Research* 28: 3-12.
- Wang, K., Bevis, M., Kendrick, E., Smalley, R., Barriga Vargas, R. y Lauría, E. 2007. Crustal motion in the zone of the 1960 Chile Earthquake; Detangling earthquake cycle deformation and forearc-sliver translation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8 Q10010.

Recibido: 23 de octubre, 2011

Aceptado: 20 de mayo, 2012