



Université du Québec
à Rimouski

**RECONSTITUTION DES SÉISMES DURANT L'HOLOCÈNE
D'APRÈS L'ANALYSE DE CAROTTES SÉDIMENTAIRES
PROVENANT DE BASSINS MARINS ET LACUSTRES,
PATAGONIE ARGENTINE ET CHILIENNE**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© NAOMI CRETTON

Novembre 2025

Composition du jury :

Urs Neumeier, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Guillaume St-Onge, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Emmanuel Chapron, codirecteur de recherche, Université de Toulouse Jean Jaurès

Nathalie Feuillet, examinateur externe, Institut de Physique du Globe de Paris

Dépôt initial le 11 août 2025

Dépôt final le 6 novembre 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

*I don't care if Monday's black
Tuesday, Wednesday, heart attack
Thursday, never looking back
It's Friday I'm in love
- The Cure*

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de recherche, **Guillaume St-Onge**, pour avoir supervisé mes travaux durant cette maîtrise. Merci de m'avoir fait confiance en me confiant ce beau projet de maîtrise lorsque je t'ai écrit en janvier 2022, alors en pleine remise en question sur mes projets post-baccalauréat. Je te remercie de m'avoir donnée l'opportunité d'aller sur le terrain en Patagonie argentine avec toi en mars 2024. Je te remercie également de m'avoir permis de prendre part à plusieurs événements en parallèle à mon projet de maîtrise, comme une école d'été et des congrès au Québec et à l'international, toutes des expériences extrêmement enrichissantes, dont je garderais de précieux souvenirs. Finalement, merci pour tes encouragements constants durant ces deux années!

Je suis également très reconnaissante envers mon codirecteur, **Emmanuel Chapron**, pour m'avoir guidé durant ce projet de maîtrise. Merci de m'avoir partagé tes connaissances sur cette région du monde que tu connais si bien. Nos échanges de chaque côté de l'Atlantique furent brefs, mais ont été assez pour me motiver à faire une thèse de doctorat avec toi à Toulouse sur les Pyrénées françaises. Un nouveau chapitre que j'ai d'ailleurs très hâte de commencer!

Je remercie également les techniciens et techniciennes qui m'ont aidé à réaliser les analyses en laboratoire : **Quentin Beauvais, Pascal Rioux, Mathieu Babin, Claude Belzile** et **Agnieszka Adamowicz-Walczak**. Je tiens à remercier énormément mes ami.es et collègues de la grotte, **Kelsey, Juliette, Florian, Élodie, Daniel, Quentin** et **Morgane** pour leur aide au laboratoire, l'interprétation de données, les relectures de textes et d'affiches ainsi que la préparation aux présentations orales. Je les remercie également pour leur soutien, leurs encouragements et leur précieux conseils qui m'ont grandement aidé à faire mes premiers pas dans le monde, pas toujours doux, de la recherche.

Je voudrais aussi remercier les membres de l'IPATEC avec qui nous avons réalisé la mission de terrain en mars 2024 au lac Puelo, **Gustavo Villarosa, Debora Beigt, Lucía Domínguez** et **Alexander Cottescu**. Je garde de magnifiques souvenirs de cette campagne de terrain au nord de la Patagonie et de mon premier séjour dans l'Hémisphère sud. **Alex**, gracias por haberme descubierto tu Patagonia del Sur durante mi segundo viaje.

Merci également à tou.tes mes ami.es de l'ISMER et de Rimouski, **Amélie, Clément, Gabrielle, Daphnée, Manon, Suzie, Juan** et **Garance** pour les beaux souvenirs! Finalement, je remercie ma garde rapprochée, **Marie Engel, Daniel Rudbäck** et **Tommy-Loup Bordeleau** qui ont célébré mes hauts et mes bas du quotidien durant ces deux années. Si cette maîtrise m'aura emmené d'un bord pis d'l'autre du globe, elle m'aura surtout amené un *support system* qui m'attendait toujours en revenant. J'y serais sans doute arrivé sans vous, mais avec beaucoup moins de plaisir et de stabilité mentale.

Enfin, je remercie ma famille, mon **père**, ma **sœur** et nos trois chien.nes, **Gypsie, Baïa** et **Mac**, qui m'ont soutenu à toutes les étapes de ce diplôme!

AVANT-PROPOS

Ce projet de maîtrise est issu d'une collaboration internationale entre des chercheurs du Canada, de la France, de l'Argentine et du Chili. Les carottes sédimentaires analysées dans le cadre de cette étude ont été récoltées dans quatre bassins marins et lacustres du nord de la Patagonie chilienne et argentine lors de trois campagnes différentes en 2007, 2008 et 2024. Les détails sur ces différentes missions sont détaillés dans l'**Introduction générale** et le **Chapitre 1**.

Ce projet de maîtrise est financé grâce au projet IRN (International Research Network), « Recovery trajectories of Societies to natural Disasters (RISCDIS) » dirigé par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en France et joignant plusieurs universités du Canada, des États-Unis et du Japon (<https://irn-riscdis.cnrs.fr/en/>).

Ce mémoire de maîtrise est divisé en 3 parties distinctes : une introduction générale rédigée en français, un chapitre rédigé en anglais sous la forme d'un article scientifique en prévision d'être soumis pour publication à la revue internationale *Marine Geology*. Le mémoire se termine par une brève conclusion générale rédigée en français. Le chapitre de ce mémoire rédigé sous forme d'article : « **Cretton, N., St-Onge, G., Villarosa, G., Foucher, A., Domínguez, L., Siani, G., Mulsow, S., Francus, P., & Chapron, E. Holocene subduction earthquake-triggered turbidites from the Reloncaví Fjord (Chile) and the proglacial Lakes Frías and Mascardi (Argentina)** » a été rédigé par moi-même sous la supervision de Guillaume St-Onge (ISMER-UQAR) et d'Emmanuel Chapron (GEODE-Université de Toulouse Jean Jaurès). En tant que première autrice de cet article, ma contribution a été la recherche bibliographique, l'interprétation des données précédemment acquises, la préparation d'échantillons, l'analyse en laboratoire, l'interprétation des résultats et la rédaction du manuscrit. Guillaume St-Onge et Emmanuel Chapron ont tous deux élaboré l'idée originale du projet de recherche et les objectifs scientifiques, déterminé les méthodes

utilisées et fourni les données précédemment acquises. Guillaume St-Onge a directement supervisé et financé le projet de maîtrise à l'ISMER, a fourni la formation et les outils requis pour le travail de laboratoire et de terrain et a fourni les ressources nécessaires à l'interprétation des données. Emmanuel Chapron a supervisé le projet de maîtrise et a fourni les ressources nécessaires à l'interprétation des données. Ils ont tous deux révisé des versions préliminaires de cet article. Les autres coauteurs et coautrices ont contribué à l'élaboration de cet article soit en participant aux campagnes de carottage, soit en réalisant des analyses en laboratoire, soit en fournissant du matériel d'analyse et/ou en aidant à l'interprétation des données.

Au laboratoire, Quentin Beauvais a aidé aux analyses en continu des carottes sédimentaires avec les différents bancs d'analyses à l'ISMER-UQAR. Pascal Rioux a réalisé les analyses au ^{137}Cs sur les échantillons de sédiments à la station aquicole de l'ISMER-UQAR. Jean-François Hélie et Agnieszka Adamowicz-Walczak ont supervisé et réalisé les analyses de $\delta^{13}\text{C}$, $\%C_{\text{tot}}$ et $\%N_{\text{tot}}$ au Laboratoire de géochimie des isotopes stables et légers du GEOTOP-UQAM. Pour ces précédentes analyses, Mathieu Babin a fourni la formation et les instruments nécessaires à la préparation des échantillons à l'ISMER-UQAR. Les analyses au ^{210}Pb ont été réalisées par Antonin Prijac au Laboratoire de radiochronologie du GEOTOP-UQAM. Finalement, Pierre Francus a permis l'imagerie rayons X des carottes à l'INRS-ETE.

Durant cette maîtrise, j'ai eu l'opportunité de participer du 17 au 22 mars 2024 à une mission de carottage au lac Puelo en Patagonie Argentine afin de récolter des carottes sédimentaires qui ont été analysés dans le cadre de mon projet de maîtrise. Finalement, j'ai eu l'occasion de présenter mes travaux de recherches lors de différents congrès provinciaux et internationaux :

Cretton, N., St-Onge, G., Chapron, E., Foucher, A. (2025). *Holocene earthquake-triggered turbidites from the Reloncaví Fjord, northern Patagonia, Chile*. Réunion scientifique annuelle de Québec Océan, Rivière-du-Loup (Canada), 26-27 février 2025, (affiche).

Cretton, N., St-Onge, G., Chapron, E., Villarosa, G., Dominguez, L., Foucher, A. (2025). *Holocene earthquake-triggered turbidites from the Reloncaví Fjord (Chile) and traces of the 1960 Great Chilean earthquake in Argentine lakes*. **Congrès étudiant du GEOTOP**, Montréal (Canada), 14-16 mars 2025 (affiche). Prix de la meilleure affiche.

Cretton, N., St-Onge, G., Chapron, E., Villarosa, G., Dominguez, L., Foucher, A. (2025). *Holocene paleoseismic record in the Reloncaví Fjord (Chilean Patagonia) and evidence of the AD 1960 Great Chilean earthquake in Argentine lakes*. **International Meeting of Sedimentology de l'International Association of Sedimentologists**, Huelva (Espagne), 26-28 juin 2025 (affiche). Prix de la meilleure affiche dans le cadre de la *Early Career Scientist Competition*.

Cretton, N., St-Onge, G., Chapron, E., Villarosa, G., Dominguez, L., Foucher, A. (2025). *Holocene paleoseismological record from the Reloncaví Fjord (Chile) and evidence from the AD 1960 Great Chilean earthquake in proglacial Lakes Frías and Mascardi (Argentina)*. **3rd Paleolimnology & Limnogeology International Symposium**, Aix-les-Bains (France), 6-10 octobre 2025 (affiche).

RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

La zone de subduction du Chili, où de nombreux séismes de fortes magnitudes ($M > 8$) ont eu lieu par le passé, présente un risque sismique très élevé. C'est au sud de cette zone de subduction qu'a eu lieu le mégaséisme le plus puissant enregistré instrumentalement de l'époque moderne, le séisme de Valdivia de 1960 M_w 9,5. Cet événement, ayant causé la rupture totale du segment tectonique de Valdivia, a été précédé de trois séismes historiques majeurs en 1837, 1737 et 1575. Étant donné que ces catastrophes naturelles peuvent engendrer d'importants dommages humains et matériels, il est essentiel de les étudier afin d'évaluer leur récurrence. Dans ce contexte, ce projet de maîtrise vise l'analyse de carottes sédimentaires provenant d'environnements marins et lacustres au nord de la Patagonie afin de reconstituer les séismes régionaux survenus sur le segment tectonique de Valdivia. Ces travaux de recherche ciblent l'interprétation des données précédemment acquises sur deux carottes sédimentaires provenant du fjord de Reloncaví (Chili) et du lac Frías (Argentine) ainsi qu'à récolter, analyser et interpréter les données de six carottes sédimentaires provenant des lacs Mascaradi et Puelo (Argentine). L'analyse continue des propriétés physiques, magnétiques, géochimiques et sédimentologiques a menée à l'identification de couches déposées rapidement dans les carottes sédimentaires. Pour chacune d'entre elles, des modèles d'âge-profondeur s'appuyant sur des datations au radiocarbone (^{14}C) et/ou sur l'activité du radionucléide ^{137}Cs ont été élaborés. La longue carotte Calypso (29 m) récoltée dans le fjord de Reloncaví retrace les (paléo)séismes régionaux survenus au cours des 8 700 dernières années. Ce nouvel enregistrement, combiné aux précédentes études paléosismologiques de la région, permet d'identifier six séismes de subduction majeurs ayant provoqué la rupture totale du segment tectonique au cours des deux derniers millénaires, et de proposer une récurrence de $\sim 342 \pm 153$ ans (1σ) pour ce type d'événement. Par ailleurs, la sédimentation de mégaturbidites dans le fjord depuis les 2 000 dernières années a été reliée à une interaction complexe entre des mouvements tectoniques locaux et l'activité volcanique Holocène affectant la stabilité du delta Puelo. De plus, l'identification de dépôts sédimentaires provoqués par le séisme de 1960 dans les carottes prélevées dans les lacs Frías et Mascaradi étend l'impact de cet événement en Argentine. Finalement, des analyses en cours sur les carottes sédimentaires récoltées dans le lac Puelo pourraient ajouter aux connaissances sur la paléosismicité et la téphrochronologie régionale. Ce mémoire de maîtrise illustre ainsi le potentiel de ce fjord et ces lacs, situés au cœur d'un système géomorphologiquement, tectoniquement et volcaniquement complexe, à retracer les événements sismiques et la pertinence d'y récolter de plus longues archives sédimentaires.

Mots clés : Séismes, mégaturbidites, Holocène, paléosismologie régionale, Fjord de Reloncaví, lacs proglaciaires, Nord de la Patagonie

THESIS ABSTRACT

The Chilean subduction zone, where numerous high-magnitude earthquakes ($M > 8$) have occurred in the past, presents a very high seismic risk. The southern part of this subduction zone was struck by the most powerful megathrust earthquake ever recorded in modern times, the AD 1960 M_w 9.5 Valdivia earthquake. This event, which caused the full rupture of the Valdivia tectonic segment, was preceded by three major historical earthquakes in AD 1837, 1737, and 1575. Given that these natural disasters can cause significant human and material damages, it is essential to study them in order to assess their recurrence. In this context, this master's thesis aims to analyze sediment cores from marine and lacustrine environments in northern Patagonia to reconstruct regional (paleo)earthquakes that occurred on the Valdivia tectonic segment. This research focuses on interpreting previously acquired data from two sediment cores from Reloncaví Fjord (Chile) and Lake Frías (Argentina), as well as collecting, analyzing, and interpreting data from six sediment cores from Lakes Mascardi and Puelo (Argentina). Continuous analysis of physical, magnetic, geochemical, and sedimentological properties has led to the identification of rapidly deposited layers in the sediment cores. For each core, age-depth models based on radiocarbon (^{14}C) dating and/or ^{137}Cs radionuclide activity have been developed. The long Calypso core (29 m) collected in the Reloncaví Fjord traces regional (paleo)earthquakes that have occurred over the last 8,700 years. This new record, combined with previous paleoseismological studies of the region, identifies six major subduction earthquakes that caused the full rupture of the tectonic segment over the last two millennia, yielding a recurrence of $\sim 342 \pm 153$ years (1σ) for this type of event. In addition, the sedimentation of megaturbidites in the fjord over the last 2,000 years has been linked to a complex interaction between local tectonic movements and Holocene volcanic activity affecting the stability along the Puelo delta. Furthermore, the identification of sedimentary deposits triggered by the AD 1960 earthquake in cores taken from the lakes Frías and Mascardi extends the impact of this event in Argentina. Finally, ongoing analyses of sediment cores collected from Lake Puelo could add to knowledge about regional paleoseismicity and tephrochronology. This master's thesis thus illustrates the potential of these fjord and lakes, located at the heart of a geomorphologically, tectonically, and volcanically complex system, to trace seismic events and the relevance to study longer archives.

Keywords: Earthquake, megaturbidites, Holocene, regional paleoseismology, Reloncaví Fjord, glacial lakes, northern Patagonia

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	vii
AVANT-PROPOS.....	ix
RÉSUMÉ DU MÉMOIRE	xiii
THESIS ABSTRACT.....	xv
TABLE DES MATIÈRES.....	xvii
LISTE DES TABLEAUX	xix
LISTE DES FIGURES	xx
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xxiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	1
2. LA GEOLOGIE COMME OUTIL.....	4
3. CONTEXTE TECTONIQUE ET VOLCANISME REGIONAL	7
4. DEGLACIATION QUATERNAIRE	10
5. SITES A L'ETUDE.....	10
6. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET METHODE.....	13
7. ORGANISATION DU MEMOIRE.....	20
CHAPITRE 1 Holocene subduction earthquake-triggered turbidites from the Reloncaví fjord (Chile) and the proglacial lakes Frías and Mascardi (Argentina).....	21
RESUME EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE	22
ABSTRACT.....	23
1. INTRODUCTION	24
2. REGIONAL SETTING.....	25

2.1	Tectonic setting and regional paleoseismicity	25
2.2	Volcanic setting.....	27
2.3	Reloncaví Fjord and its potential for paleoseismic reconstruction	29
3.	METHOD	34
3.1	Geophysical data and core sampling.....	34
3.2	Sedimentological analyses and chronology	35
4.	RESULTS	41
4.1	Reloncaví Fjord.....	41
4.2	Lake Frías	49
4.3	Lake Mascardi	51
5.	DISCUSSION	53
5.1	The recent events record of Lake Mascardi	53
5.2	The regional historical earthquakes in the proglacial Lake Frías.....	55
5.3	The Holocene Reloncaví Fjord record and the regional paleoseismicity	56
5.4	Changes in sedimentary dynamic in Reloncaví Fjord and implications	62
6.	CONCLUSION	64
7.	ACKNOWLEDGMENTS	65
	CONCLUSION GÉNÉRALE	67
	ANNEXES	72
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Détails sur le travail de terrain et les analyses de laboratoire réalisés dans le cadre de la maîtrise.	19
Table 1 Identification of the cores presented in this study	35
Table 2 Radiocarbon (^{14}C) analyses calibrated in Calib 8.2 (Stuiver et al., 2020) with Marine20 (Heaton et al., 2020) and SHCal20 (Hogg et al., 2020) curves. Samples in red were not used in the age models due to their proximity to turbidites and the potential remobilisation.....	39
Table 3 Radiocarbon (^{14}C) ages calibrated using the South Hemisphere Zone 1-2 (SHZ1_2) post-bomb calibration curve in CALIBomb (Reimer & Reimer., 2025) using the fraction modern values $F^{14}\text{C}$	40
Table 4 Sedimentary facies identified in core MD07-3107. Examples of each facies are illustrated in Figure. 5	46
Table 5 Characteristics of the 31 rapidly deposited layers (RDL) identified in core MD07-3107.....	48
Table 6 Characteristics of the rapidly deposited layers (RDL) identified in core FR08-3 and Masc-90424.....	53
Table 7 Earthquakes identify from RDL in the Reloncavi Fjord (MD07-3107), Lake Frías (FR08-3) and Lake Mascardi (Masc-90424). The X on the table indicate whether the RDL are synchronous with deposits from other paleoseismic sites as shown in Figure. 10	61
Table S1 The geochemical composition in major elements of samples took from core MD07-3107 (Reloncavi Fjord). Sample MD07-3107-2795 was collected in the tephra layer Rel-Tp, whereas samples MD07-3107-2765 and MD07-3107-2755 were collected in the base of megaturbidite T8.....	73
Table S2 The geochemical composition in major elements of glass shards sampled in the coarse base of turbidite Fr3 from core FR08-3 (Lake Frias).	73

LISTE DES FIGURES

Figure I. Les séismes ($M > 7,5$) survenus entre 1889 (année du premier enregistrement téléseismique d'un séisme japonais en Allemagne) et 2019 (tirée de Ou et al., 2025).	1
Figure II. Carte illustrant la zone de subduction à l'ouest de l'Amérique du Sud et les séismes majeurs survenus dans cette zone depuis 1900 (tirée de Petersen et al., 2018).	3
Figure III. Images illustrant les dégâts à la suite du séisme historique de 1960 dans la ville de Valdivia au Chili.	4
Figure IV. Schéma illustrant les phénomènes géologiques pouvant engendrer la sédimentation de couches déposées rapidement dans les environnements lacustres et marins. Les séismes issus de failles terrestres et du mouvement des plaques tectoniques sont illustrés. GLOF : <i>Glacial Lake Outburst Flood</i> , inondation causée par le débordement d'un lac glaciaire. Tirée de Sabatier et al. (2022).	5
Figure V. Carte du segment tectonique de Valdivia (38-46°S). À gauche : les zones de rupture approximatives des séismes régionaux d'après les récits historiques (Lomnitz, 2004 ; Cisternas et al., 2017a) et les études paléosismologiques régionales (Cisternas et al., 2005 ; Moernaut et al., 2018 ; Wils et al., 2020). À droite : schéma de la zone de subduction où la zone de faille Liquiñe-Ofqui, les principaux volcans et la localisation des bassins marins et lacustres étudiés dans le cadre de ce mémoire de maîtrise sont indiqués. Le rectangle blanc encadre la zone présentée à la Figure VI	8
Figure VI. Localisation des sites à l'étude : le fjord de Reloncaví et les lacs Frías, Mascardi et Puelo. Les principaux volcans, lacs et rivières de la zone sont illustrés.	11
Figure VII. Le navire de recherche <i>Marion Dufresne II</i> et l'ouverture sur le pont de la carotte CASQ MD07-3108 lors de la mission MD/159 Pachiderme.	15
Figure VIII. Campagne de carottage au lac Puelo. A) Photo du delta Turbio, B) l'équipe sur le terrain après la récolte de la première carotte sédimentaire et C) localisation des carottes sédimentaires récoltées durant la mission.	16

Figure IX. Analyses de laboratoire sur les carottes des lacs Mascardi et Puelo. A) Mesure en ligne sur le banc d'analyses MSCL, B) découpe de la carotte LP24-05 du lac Puelo où l'on observe un changement de couleur drastique et C) observation du téphra identifié au sommet de la carotte LP24-05 au microscope électronique à balayage (MEB) (© Naomi Cretton, 2024).	18
Figure X A) Localisation des carottes récoltées dans le lac Puelo. Résultats de l'analyse multi-traceurs sur les carottes B) LP24-04 et C) LP24-05. Les triangles rouges indiquent les âges ^{14}C calibrés.	69
Figure. 1 A) Tectonic setting of the study area. Left panel indicates the approximate rupture zones of the historical earthquakes along the Valdivia tectonic segment according to historical record and paleoseismic studies (Lomnitz, 2004; St-Onge et al., 2012; Moernaut et al., 2018; Wils et al., 2020). Right panel illustrates the tectonic and volcanic setting of the study area. B) Area showing the geomorphological and hydrological setting in the vicinity of the studied fjord and lakes. The main river courses are illustrated by blue lines, the nearby volcanoes by triangles in shades of orange representing the level of activity (pale being less active and dark being recently active; Martinez Fontaine et al., 2023) and the local faults surrounding the fjord by brown lines (SERNAGEOMIN, 2003). C) Zoomed area showing the Frías River and Upper Manso River draining the glacial tongues of the Cerro Tronador into Lake Frías and Lake Mascardi respectively.....	29
Figure. 2 A) Bathymetric map of Seno Reloncaví and Reloncaví Fjord from the GEBCO database 2024. B) 3.5 kHz pingar seismic profile in the outer basin of Reloncaví Fjord shows the coring sites of HAPS core MD07-3106 (40-cm long, not shown), CASQ core MD07-3108 (7.41-m long) and Calypso piston core MD07-3107 (28.75-m long) (modified from Viel et al., 2015). C) Location of core FR08-3 and core LF-94-P2 on a bathymetric map of Lake Frías (modified from Ariztegui et al., 2007). D) Location of core Masc-90424 on a bathymetric map of the Manso delta of Lake Mascardi acquired in 2024.	32
Figure. 3 The 22 sections of core MD07-3107 (colour processed using Fiji image processing package) labelled with roman number (I to XXII). Location of samples for ^{14}C measurements and layers containing volcanic glass are shown (see legend).....	36
Figure. 4 Physical, magnetic, geochemical and sedimentological properties of core MD07-3107 and identification of 31 RDLs from six sedimentary facies including the hemipelagic sediment. Wet bulk density, a^* and b^* curves are smoothed using a 2-points moving average.	42

Figure. 5 Examples of each sedimentary facies identified in core MD07-3107 (except the tsunami layer).....	44
Figure. 6 The geochemical composition of the fallout tephra (Rel-Tp) from core MD07-3107 and the remobilised tephra layer from core FR08-3 (Fr-Tp), compared with the geochemical composition of the nearby volcanoes of the area : Calbuco (López-Escobar et al., 1995; Sellés & Moreno, 2011), Osorno (López-Escobar et al., 1992 ; Moreno et al., 2010), and Puyehue-Cordon Caulle (Singer et al., 2008) on the Total Alkali Silica (TAS) diagram (LeBas et al., 1986) and bivariate plots. The geochemical composition of Rel-Tp and Fr-Tp are given in Table S1 and Table S2	45
Figure. 7 Age-depth model of core MD07-3107 based on radiocarbon dating made with the R software Bacon package using Bayesian statistics. Black line illustrates the median age, and the grey area illustrates the 95% confidence interval. The probabilistic age distribution of each RDL is illustrated.....	47
Figure. 8 A) Physical, magnetic, geochemical and sedimentological properties of core FR08-3 from Lake Frías and its age model based on ^{137}Cs activity, ^{14}C measurements and varve counting made with the R software Bacon package. The detection of ^{137}Cs activity shows the start of the atmospheric concentration in AD ~1954 and their maximum in AD 1964-1965 (Foucher et al., 2021). The ages obtain from varve counting between each turbidites are indicated by yellow stars. B) Zoom on turbidites Fr3 and Fr4 illustrating the coarse base of turbidite Fr3 containing a mixture of epiclastic and volcanic fragments.	51
Figure. 9 Physical, magnetic, geochemical and sedimentological properties of core Masc-90424 from Lake Mascardi and its age model based on ^{137}Cs activity and ^{14}C ages made with R software Bacon package. VN GLOF: Ventisquero Negro Glacial Lake Outburst Flood.....	52
Figure. 10 Paleoseismic records along the Valdivia tectonic segment in south-central Chile showing age intervals of megathrust earthquake deposits at different locations: Lakes Calafquén and Riñihue (Moernaut et al., 2014; 2018), Lake Puyehue (Moernaut et al., 2007), Maullín (Cisternas et al., 2005), Chucalén (Garrett et al., 2015), Chaihuín (Hocking et al., 2021), Lake Huelde (Kempf et al., 2017), Lake Cucao (Kempf et al., 2020) and Aysén Fjord (Wils et al., 2020) in comparison with the records of Reloncaví Fjord, Lake Frías and Lake Mascardi (this study). Note that the map and the paleoseismic records are not to scale with each other.	60
Figure. 11 Schematic interpretations of the different mechanisms contributing to the development of megaturbidite (median age) during the last ~2,000 cal BP. The volcanic activity is based on the volcanic eruptions reconstructed based	

on tephra horizons from terrestrial outcrops off the Reloncavi Fjord from Watt et al. (2011) as well as the BOOM! database (Martinez Fontaine et al., 2023). 62

Figure. S1 Correlation between core MD07-3108 and core MD07-3107 based on the magnetic susceptibility (k_{LF}) values along both cores. The ^{14}C age recovered at 562-cm depth in core MD07-3108 was correlated at 538-cm in core MD07-3107..... 72

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AD	<i>Anno Domini</i>
ANR	Agence nationale de la recherche
CONICET	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
EDS	<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>
ICP-MS	<i>Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry</i>
IMAGES	<i>International Marine Past Global Change Study</i>
INRS-ETE	Institut national de la recherche scientifique – Eau Terre Environment
IPATEC	Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales
ISMER	Institut des sciences de la mer
kLF	Low field volumetric magnetic susceptibility; susceptibilité magnétique volumique en champ faible
LOFZ	<i>Liquiñe-Ofqui Fault Zone</i> , zone de faille Liquiñe-Ofqui
LSCE	Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
m b.s.l	Meter below sea level; mètre en-dessous du niveau marin
m. a.s.l	Meter above sea level; mètre au-dessus du niveau marin
MMI	<i>Modified Mercalli Intensity</i> ; Intensité Mercalli modifiée
MSCL	<i>Multi Sensor Core Logger</i> , banc de mesures en continu

M_w	<i>Moment magnitude</i> ; magnitude de moment
R/V	<i>Research Vessel</i> , navire de recherche
RDL	<i>Rapidly deposited layers</i> , couches déposées rapidement
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i> , microscope électronique à balayage
SVZ	<i>Southern Volcanic Zone</i> , zone volcanique sud
UNComa	Universidad Nacional del Comahue
UQAM	Université du Québec à Montréal
UQAR	Université du Québec à Rimouski
VEI	Volcanic explosivity index; Index d'explosivité volcanique
X-CT	<i>X-Ray Computed Tomography</i> ; analyses aux rayons X par tomodensitométrie
XRF	<i>X-Ray Fluorescence</i> ; Fluorescence à rayons X

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Les séismes sont des catastrophes naturelles qui surviennent principalement à la limite des plaques tectoniques (Kelleher et al., 1973). En effet, les mouvements des plaques les unes sur les autres, soit dans un contexte de convergence, de subduction ou de failles transformantes, génèrent des instabilités et des tensions dans la croûte terrestre ce qui favorise l'occurrence de séismes (Duarte & Schellart, 2016). Les zones de subduction sont connues pour être parmi les plus actives sismiquement. La **Figure I**, répertoriant les séismes majeurs survenus entre 1889 et 2019, illustre bien l'abondance des séismes au niveau des zones de subduction, tel qu'au long de la marge active des Cascades ou la marge Indonésienne.

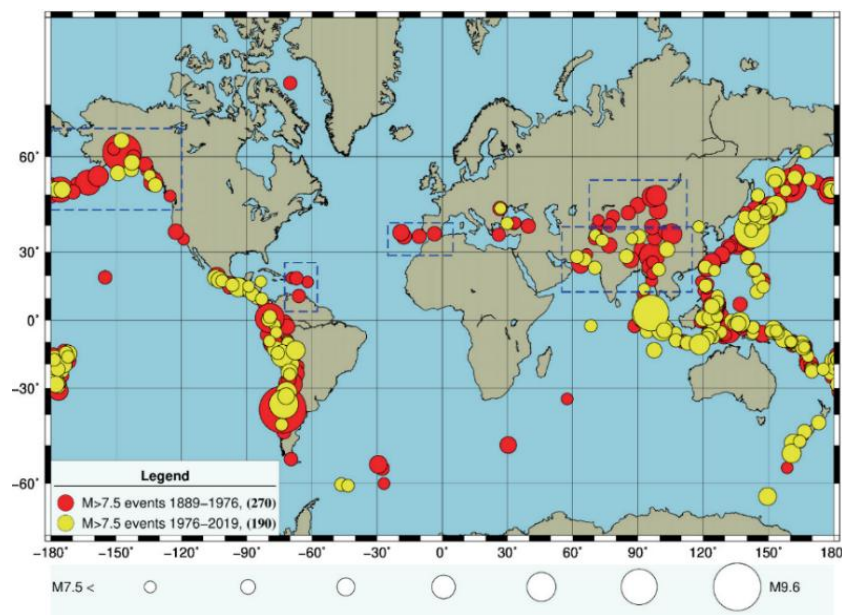


Figure I. Les séismes ($M > 7,5$) survenus entre 1889 (année du premier enregistrement téléseismique d'un séisme japonais en Allemagne) et 2019 (tirée de Ou et al., 2025).

La zone de subduction du Chili possède également un risque sismique très élevé, où la majorité des côtes chiliennes présentent un risque de plus de 70% d'être atteinte par un séisme modéré (*Modified Mercalli Intensity* ; $\text{MMI} \geq \text{VII}$) durant le prochain siècle (Petersen et al., 2018). Plusieurs séismes majeurs ont frappé cette zone de subduction par le passé (**Figure II**), tel que le tristement célèbre mégaséisme historique de Valdivia en 1960 (*Moment magnitude* ; M_w 9,5). Cet événement majeur, survenu les 21 et 22 mai 1960, dont l'épicentre se situe près de la ville de Valdivia (39,8°S) au Chili, a provoqué la rupture de la plaque tectonique sur plus de 1 000 km de long (entre 38 et 46°S de latitude) et plus de 150 km de large (Plafker & Savage, 1970 ; Cifuentes, 1989). Le tsunami qui a suivi, a non seulement frappé les côtes du Chili avec des vagues entre 10 et 20 mètres de hauteur (Plafker & Savage, 1970), mais également celles d'Hawaï (Eaton et al., 1961) et du Japon (Katô et al., 1961), causant des milliers de victimes de chaque côté de l'océan Pacifique. Une éruption du complexe volcanique Puyehue-Cordon Caulle s'est également produite le 24 mai, soit seulement 38h après le choc sismique principal du 22 mai 1960 (Lara et al., 2004 ; Watt et al., 2009a). Outre les pertes humaines considérables, qui s'élèvent à plus de 2000 victimes uniquement au Chili, cet événement majeur a également causé d'importants dommages matériels (**Figure III** ; Plafker & Savage, 1970). Cet événement de 1960 n'est qu'un des nombreux exemples des séismes majeurs qui ont frappé cette région. Les récits historiques ont démontré que de nombreux événements sismiques de fortes magnitudes ont frappé cette zone de subduction depuis les derniers 500 ans (Lomnitz, 2004). Durant ces événements, souvent accompagnés de tsunamis et d'éruptions volcaniques tel que démontré lors du séisme de 1960, des dommages extrêmes sont causés aux populations et aux infrastructures.

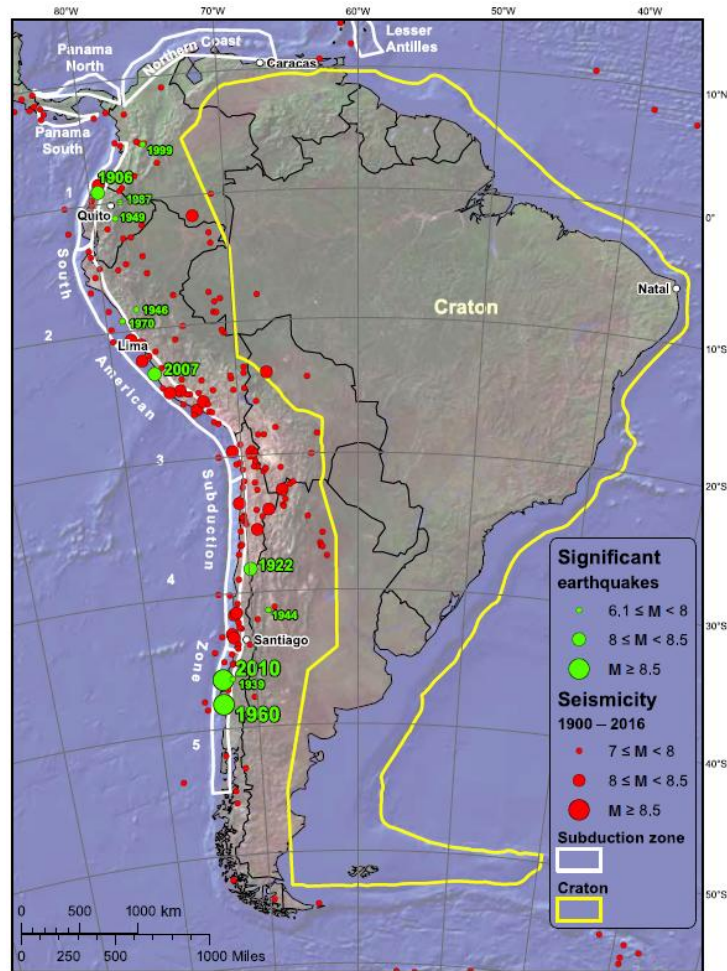


Figure II. Carte illustrant la zone de subduction à l'ouest de l'Amérique du Sud et les séismes majeurs survenus dans cette zone depuis 1900 (tirée de Petersen et al., 2018).

De ce fait, les conséquences des séismes rendent nécessaire l'étude des territoires présentant un haut risque pour cet aléa, puisqu'une meilleure compréhension de ces catastrophes naturelles permet d'évaluer leur récurrence dans le temps, et ainsi, permet aux gouvernements et aux populations de mieux s'y préparer. Le récent mégaséisme survenu le 29 juillet 2025 au large de la péninsule de Kamchatka en Russie orientale illustre bien la nécessité d'étudier ces phénomènes géologiques. Ce mégaséisme de magnitude 8,8, en faisant le 6^e plus puissant séisme de l'époque instrumentale moderne (USGS, 2025), s'est produit dans la zone de subduction Kuril-Kamchatka, une région régulièrement frappée par des séismes tsunamigéniques en raison de sa proximité avec l'océan Pacifique (MacInnes et

al., 2016 ; Gusiakov et al., 2024). À la suite de ce mégaséisme, une alerte générale de tsunami a entraîné l'évacuation rapide de plusieurs millions de personnes habitant les côtes de l'océan Pacifique, tel qu'au Japon, à Hawaï, au Chili ou au Pérou (Radio-Canada, 2025). Aucun décès n'a toutefois été provoqué par cet événement, démontrant l'importance des mesures à prendre pour assurer la sécurité des populations de territoires vulnérables et la nécessité de prédire ces catastrophes naturelles.



Figure III. Images illustrant les dégâts à la suite du séisme historique de 1960 dans la ville de Valdivia au Chili.

2. LA GEOLOGIE COMME OUTIL

L'une des méthodes permettant de reconstituer les séismes dans le temps est la paléosismologie, une discipline qui consiste à étudier les traces des séismes dans les structures géologiques. Les milieux marins et lacustres sont des milieux particulièrement sensibles à ce type de catastrophes naturelles, puisque les secousses sismiques peuvent déstabiliser les sédiments le long des pentes des bassins et causer la sédimentation rapide de dépôts particuliers. Ces dépôts sont désignés par plusieurs appellations selon les études, mais nous utiliserons ici le terme « couches déposées rapidement » (*rapidly deposited layers* ; RDL), suivant la définition donnée par St-Onge et al. (2012). Les RDL peuvent appartenir à différents types selon leurs caractéristiques sédimentologiques et leur mécanisme de dépôts (**Figure IV**), telles que les turbidites, les hyperpycnites, les débrites, les dépôts de masse (*mass-wasting deposits* ; MWD) et les téphras (St-Onge et al., 2012). La récolte de carottes sédimentaires dans des milieux marins et lacustres permet d'identifier de telles couches grâce

à l'analyse en continue de leurs propriétés physiques, magnétiques, géochimiques et sédimentologiques (St-Onge et al., 2007). Le principal défi des études paléosismologiques consiste à attribuer l'origine de ces RDL à des séismes, plutôt qu'à d'autres phénomènes géologiques, tels que les tempêtes ou les crues saisonnières, pouvant engendrer des dépôts similaires (**Figure IV**). Le principal critère permettant d'attribuer une origine sismique aux RDL est l'existence d'une synchronicité entre l'âge des dépôts et la date d'un séisme historique (Adams, 1990 ; Crozier et al., 1995 ; Schnellmann et al., 2002). Par ailleurs, la récolte de carottes sédimentaires au sein de bassins confinés, c'est-à-dire loin des apports sédimentaires riverains directs ou en zones distales profondes, permet de réduire le risque que d'autres phénomènes géologiques soient à l'origine des RDL (Mérindol et al., 2022 ; Seibert et al., 2024 ; Moernaut et al., 2025).

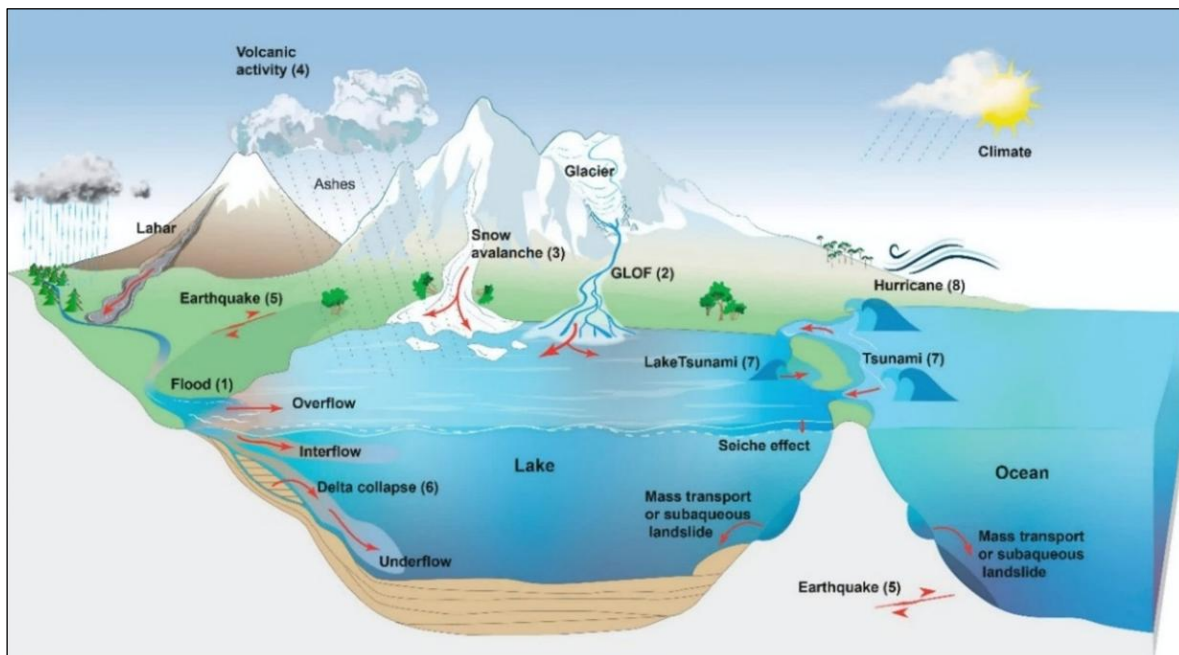


Figure IV. Schéma illustrant les phénomènes géologiques pouvant engendrer la sédimentation de couches déposées rapidement dans les environnements lacustres et marins. Les séismes issus de failles terrestres et du mouvement des plaques tectoniques sont illustrés. GLOF : *Glacial Lake Outburst Flood*, inondation causée par le débordement d'un lac glaciaire. Tirée de Sabatier et al. (2022).

Suivant ces découvertes, les régions à risque sismique élevé ont fait l'objet d'un nombre important d'études paléosismologiques utilisant des archives sédimentaires marines et lacustres. Par exemple, les turbidites marines ont été utilisées afin de reconstituer les séismes sur les marges actives des Cascades (Goldfinger et al., 2012), Hikurangi au large de la Nouvelle-Zélande (Howarth et al., 2021), des Petites Antilles (Seibert et al., 2024) ainsi qu'au Japon (Strasser et al., 2024). De plus, les études paléosismologiques lacustres, qui suivent une augmentation significative à l'échelle mondiale depuis les dernières décennies selon un recensement récent (Moernaut et al., 2025), ont permis de retracer les séismes survenus durant l'Holocène à de nombreux endroits, tels que les Alpes (Strasser et al., 2006 ; Guyard et al., 2007), le Massif central français (Chassiot et al., 2016) et l'est du Canada (Lajeunesse et al., 2017 ; Brooks et al., 2020), pour ne nommer que ceux-ci.

Le sud de la zone de subduction du Chili, hôte du séisme de 1960, n'est pas en reste et a également fait l'objet de nombreuses études paléosismologiques depuis les dernières décennies. Ces études ont entre autres démontré le potentiel des nombreux lacs (e.g., Chapron et al., 2006 ; Bertrand et al., 2008b ; Moernaut et al., 2014 ; Kempf et al., 2020) et fjords (e.g., St-Onge et al., 2012 ; Piret et al., 2018 ; Wils et al., 2020) de cette région à préserver différents types de RDL déclenchées par des séismes. Par exemple, plusieurs études se sont penchées sur l'impact du séisme de 1960 dans les lacs chiliens au sud de la région épicerentre, tels que les lacs Puyehue, Villarica, Rupanco et Llanquihue (Chapron et al., 2006 ; 2007 ; Van Daele et al., 2015). Des études ont également illustré l'impact de cet événement du côté argentin de la cordillère des Andes, tels qu'au lac Nahuel Huapi (Chapron et al., 2006 ; Villarosa et al., 2009), où le séisme de 1960 aurait provoqué un glissement subaquatique engendrant des vagues de tsunami importantes, qui ont ensuite détruit le port de la ville de San Carlos de Bariloche. Par ailleurs, de longs enregistrements paléosismologiques sont également disponibles dans cette zone. Les carottes lacustres récoltées dans les lacs Calafquén et Riñihue retraçant les séismes des 3500 et 4700 dernières années, respectivement, en sont un exemple (Moernaut et al., 2014 ; 2018). De plus, le fjord d'Aysén, situé au sud de la zone de subduction, offre le plus long enregistrement paléosismique grâce à l'étude d'une longue carotte Calypso de 21 m, permettant de reconstituer les séismes

survenus au cours des 9000 dernières années (Wils et al., 2020). Par ailleurs, comme les séismes de cette région côtière sont souvent accompagnés de tsunamis et d'une subsidence du territoire, plusieurs études ont démontré que les dépôts de tsunamis retrouvés dans les marais ou lacs côtiers peuvent servir de traceur fiable pour reconstituer l'historique des séismes tsunamigéniques (e.g., Cisternas et al., 2005 ; Garrett et al., 2015 ; Kempf et al., 2017 ; Hocking et al., 2021).

3. CONTEXTE TECTONIQUE ET VOLCANISME REGIONAL

La zone de subduction du Chili est une zone très complexe où les plaques Nazca et Antarctique, ainsi que la dorsale formée par l'extension de ces deux plaques (*Chile Rise*), entrent en subduction sous la plaque Amérique du Sud à des vitesses respectives de ~66-78 mm/an et ~18 mm/an (DeMets et al., 2010). Les trois plaques se rencontrent à la jonction triple du Chili (CTJ) vers 46°S de latitude (**Figure V**). Au Chili, cette subduction est à l'origine de la formation de deux chaînes de montagnes parallèles, la cordillère des Andes (*Cordillera de los Andes*) et la cordillère de la côte (*Cordillera de la Costa*), séparées par la vallée centrale chilienne (*Chilean Central Valley*, CCV). Alors que la cordillère des Andes traverse tout le pays, la cordillère de la côte prend fin vers 41°S à l'Île de Chiloé, tout comme la vallée centrale, qui est submergée au sud de Puerto Montt (Segerstrom, 1964). De plus, la subduction oblique de la plaque Nazca sous la plaque Amérique du Sud est à l'origine de la formation du système de failles Liquiñe-Ofqui (*Liquiñe-Ofqui Fault Zone* ; LOFZ) (Cembrano et al., 1996). Ce système de failles est composé de plusieurs fractures intra-arc s'échelonnant de façon N-S sur plus de 1000 km au nord de la CTJ (**Figure V**) et est caractérisé par une forte sismicité et un volcanisme actif (Vargas et al., 2013 ; Van Daele et al., 2013). L'alignement surprenant des volcans andins le long de ce système de failles avait d'ailleurs été souligné par Cembrano et al. (1996).

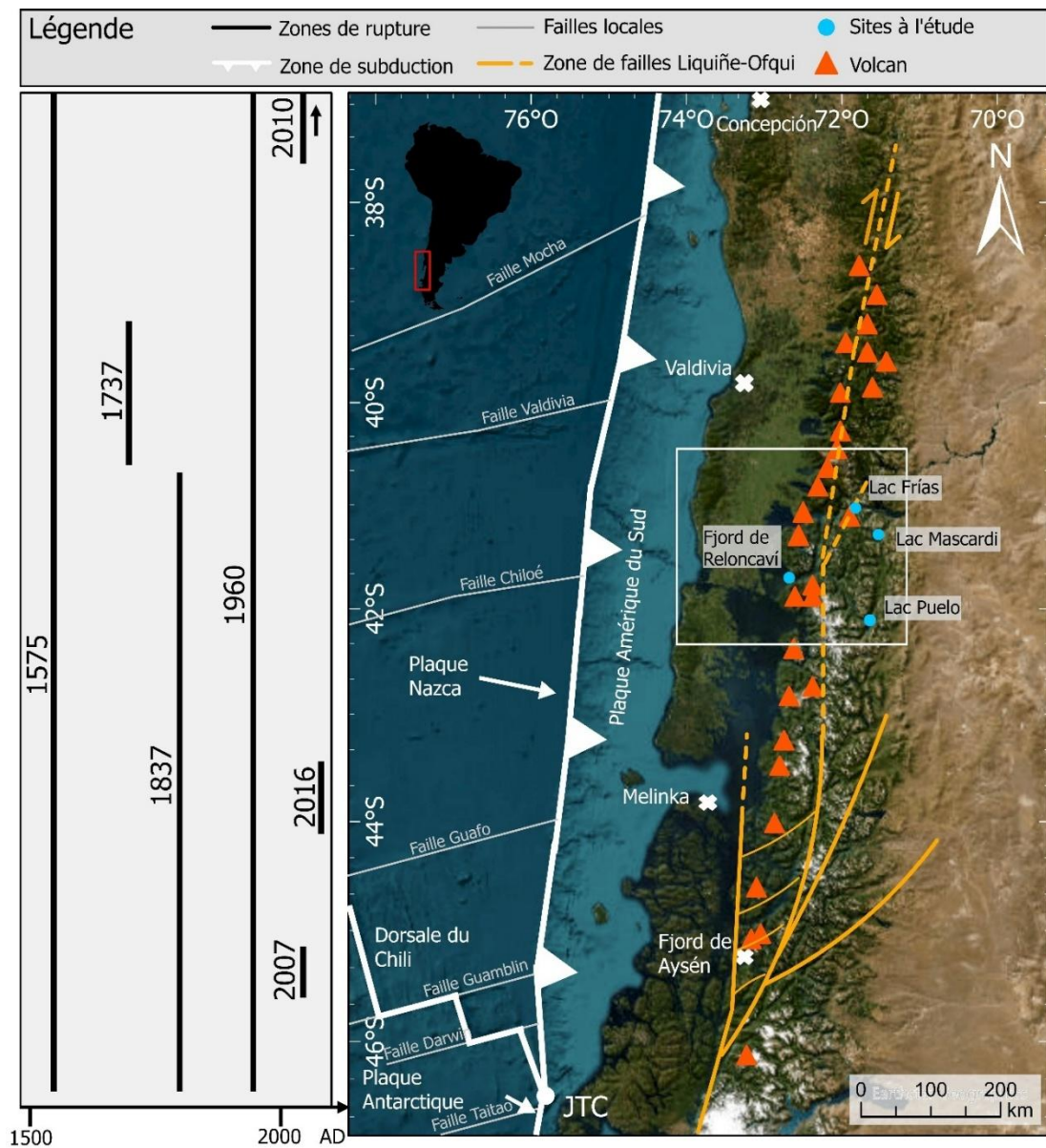


Figure V. Carte du segment tectonique de Valdivia (38-46°S). À gauche : les zones de rupture approximatives des séismes régionaux d'après les récits historiques (Lomnitz, 2004 ; Cisternas et al., 2017a) et les études paléosismologiques régionales (Cisternas et al., 2005 ; Moernaut et al., 2018 ; Wils et al., 2020). À droite : schéma de la zone de subduction où la zone de faille Liquiñe-Ofqui, les principaux volcans et la localisation des bassins marins et lacustres étudiés dans le cadre de ce mémoire de maîtrise sont indiqués. Le rectangle blanc encadre la zone présentée à la **Figure VI**.

Cette zone de subduction du Chili est composée de plusieurs segments tectoniques (Melnick et al., 2009). Dans la région centrale-sud du Chili, le segment tectonique de Valdivia, situé entre 38-46°S de latitude, a abrité le mégaséisme de subduction de Valdivia en 1960 (M_w 9,5), ainsi que ses prédécesseurs : les séismes de 1837 ($M_w \leq 8$), 1737 ($M_w \sim 7.5$) et 1575 (Lomnitz, 2004). Aucun séisme de magnitude supérieure à 8 n'est survenu dans ce segment depuis 1960 (USGS, 2025). Le plus récent large séisme au sein de ce segment tectonique a eu lieu au sud de l'île de Chiloé, près de la ville de Melinka, en 2016 (M_w 7.6) (Lange et al., 2017). Dans le segment tectonique voisin de Maule, un mégaséisme de subduction est survenu récemment, le séisme de Concepción (M_w 8,8) en 2010. Par ailleurs, la sismicité active de la LOFZ peut être illustré par l'essaim de séismes crustaux (> 7200) survenu entre janvier et juin 2007 (M_w max 6.2) dans le fjord d'Aysén (45,5°S) (Legrand et al., 2011 ; Vargas et al., 2013).

La zone de subduction du Chili fait également partie de la ceinture volcanique circumpacifique ou, communément appelé « Ceinture de feu du Pacifique », et est caractérisée par un fort volcanisme. Plus précisément, le segment tectonique de Valdivia fait partie de la Zone volcanique sud (*Southern Volcanic Zone* ; SVZ) entre 33° et 46°S, constituée d'environ 60 volcans très actifs, alignés le long de la LOFZ (Cembrano et al., 1996 ; Naranjo & Stern, 2004 ; Martinez Fontaine et al., 2021). Récemment, trois des volcans de cette zone ont connu de puissantes éruptions, le volcan Chaitén en 2008 (Watt et al., 2009b), le complexe volcanique Puyehue-Cordon Caulle en 2011-2012 (Bertrand et al., 2014) et le volcan Calbuco en 2015 (Romero et al., 2016). Ces études ont d'ailleurs permis de mettre en évidence l'impact de ces éruptions volcaniques sur la dynamique sédimentaire des bassins marins et lacustres environnants. De façon similaire à la paléosismologie, la téphrochronologie permet de reconstituer les éruptions volcaniques passées à partir de l'analyse de téphras (i.e., des dépôts de cendres volcaniques) retrouvés dans les affleurements terrestres (Watt et al., 2011) ainsi que dans les carottes sédimentaires marines (Martinez Fontaine et al., 2021) et lacustres (Bertrand et al., 2014).

4. DEGLACIATION QUATERNAIRE

Durant le dernier maximum glaciaire, la calotte glaciaire de Patagonie (*Patagonian Ice Sheet* ; PSI) s'étendait sur la cordillère des Andes entre 38 et 55°S de latitude. Au nord de la Patagonie, où le dernier maximum glaciaire est évalué il y a ~20-21 000 ans (Clapperton, 1994), plusieurs lobes glaciaires s'étendaient à l'ouest, dans la vallée centrale du Chili, notamment sur les bassins qui portent aujourd'hui les noms de lac Llanquihue, de baie de Reloncaví et du golf d'Ancud (Porter, 1981). La déglaciation quaternaire qui a suivi, a engendré l'érosion de nombreux fjords et lacs, formant actuellement, la région des lacs au Chili (*Chilean Lake District*) entre 39 et 42°S. Aux mêmes latitudes en Argentine, la déglaciation à la fin du Pléistocène aurait provoqué le vidage d'un vaste paléolac glaciaire, instaurant le réseau hydrographique actuel, composé petits lacs glaciaires, dont la plupart sont drainés vers l'océan Atlantique, à l'ouest, mais certains vers l'océan Pacifique, à l'est, en raison de l'érosion glaciaire qui a favorisé de nouvelles voies de drainage (Tatur et al., 2002).

Actuellement, la cordillère des Andes abrite encore quatre champs de glace principaux, mais ceux-ci sont situés au sud du continent, à partir de 46°S (Davies et al., 2020). Au nord de la Patagonie, quelques glaciers de montagne forment les derniers vestiges de la PSI, tels que le Cerro Tronador (3554 m a.s.l), un volcan éteint recouvert de glace situé sur la frontière entre le Chili et l'Argentine.

5. SITES A L'ETUDE

Ce projet de recherche vise l'étude de carottes sédimentaires récoltées dans le fjord de Reloncaví (Chili) et les lacs proglaciaires Frías, Mascardi et Puelo (Argentine), tous situés au nord de la Patagonie (**Figure V**). Ces bassins marins et lacustres sont situés dans un rayon de 100 km les uns des autres et, bien que localisés de part et d'autre de la cordillère des Andes, leurs réseaux de drainage sont interconnectés (**Figure VI**).

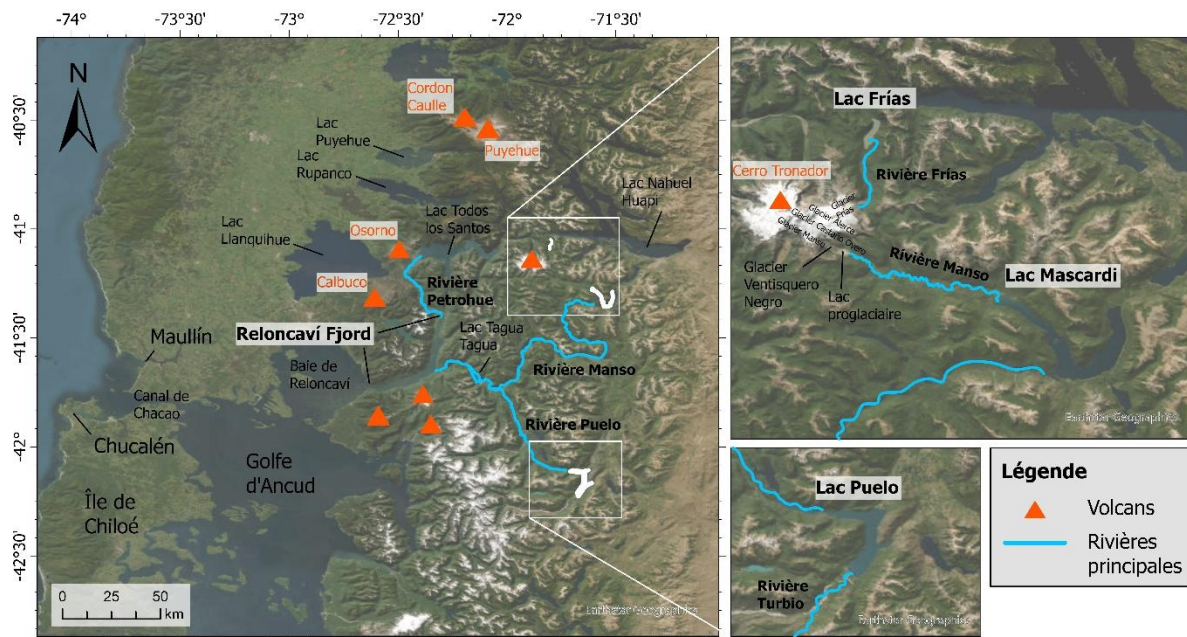


Figure VI. Localisation des sites à l'étude : le fjord de Reloncaví et les lacs Frías, Mascardi et Puelo. Les principaux volcans, lacs et rivières de la zone sont illustrés.

Fjord de Reloncaví

Le fjord de Reloncaví (41.7°S) situé dans la région des lacs au Chili est une vallée glaciaire en forme de J, longue d'environ 55 km et étroite (< 3 km de large), qui se situe dans l'axe de la LOFZ (Valle-Levinson et al., 2007 ; **Figure V**). Ce fjord draine le lac Todos los Santos par la rivière Petrohué et les lacs Tagua-Tagua, Puelo et Mascardi par les rivières Puelo et Manso, toutes deux prenant leur source en Argentine (**Figure VI**). Le fjord de Reloncaví, composé de trois bassins profonds séparés par des seuils, est connecté à la Baie de Reloncaví (*Seno Reloncaví*) par son bassin externe profond (~460 m). Cette baie est soumise à de fortes marées pouvant atteindre 8 m de hauteur (Castillo et al., 2012). Le fjord de Reloncaví reçoit l'influence marine de cette baie sous la forme d'un courant de 10 cm/s (Valle-Levinson et al., 2007). Le fjord est entouré de nombreux volcans ayant connu des éruptions durant l'Holocène : les volcans Calbuco, Orsorno, Chaitén, Puyehue, Cordon Caulle et Yate (Naranjo & Stern, 2004; Watt et al., 2011; Martinez Fontaine et al., 2021).

Des profils sismiques utilisant des sources *pinger* et *sparker* ont été enregistré en 2004 et 2007 dans le fjord de Reloncavi (Chapron et al., 2006 ; St-Onge et al., 2012 ; Viel et al., 2015) menant à la découverte d'une succession de mégaturbidites empilées devant un dépôt contouritique (*drift deposit*) dans le bassin externe du fjord. St-Onge et al. (2012) ont mené une étude paléosismologique en utilisant la carotte MD07-3108 prélevée dans le bassin externe du fjord de Reloncavi. Cette carotte a permis l'identification de quatre mégaturbidites déclenchées par des séismes ainsi qu'un dépôt de tsunami, illustrant le caractère simultané de ces deux types de phénomènes. Ces quatre mégaturbidites ont été associées aux séismes historiques de 1960, 1837, 1575 (et son tsunami) ainsi qu'à un séisme tsunamigénique préhistorique survenu vers 1280-1390, dont les traces ont été retrouvées dans l'estuaire de Maullín, situé à proximité du fjord (**Figure VI**).

Lacs glaciaires

Du côté argentin, trois lacs proglaciaires profonds, composés de deltas actifs et situés au piedmont de la cordillère des Andes ont été étudiés : les lacs Frías (41°S), Mascardi (41.3°) et Puelo (42.2°S). Au nord, le lac Frías (790 m au-dessus du niveau marin), avec une profondeur maximale de 75 m, reçoit, par la rivière Frías, les eaux de fonte de la langue glaciaire Frías du Cerro Tronador (Ariztegui et al., 2007 ; 2008). Ariztegui et al. (2007) ont démontré que le remplissage sédimentaire composé de varves de ce lac enregistre les fluctuations climatiques durant le Petit âge glaciaire. Le lac Mascardi (790 m au-dessus du niveau marin), atteint une profondeur maximale de 215 m et reçoit les eaux de fonte de trois langues glaciaires du Cerro Tronador (Ariztegui et al., 2001) par la rivière Manso supérieure, qui s'écoule dans le lac à un débit moyen de 11 m³/s (Pasquini et al., 2008). De plus, l'acquisition de profils sismiques et l'analyse de carotte dans ce lac ont permis de reconstituer des changements paléoenvironnementaux Holocène liés à la déglaciation (Ariztegui et al., 2001). Un peu plus au sud, le lac Puelo (150 m au-dessus du niveau marin), est caractérisé par une profondeur maximale de 180 m. Il est, quant à lui, nourri par la rivière Turbio et le ruisseau Derrumbe au sud qui prennent leur source dans les glaciers environnants, tel que le

Cerro Tres Picos (Pasquini et al., 2008 ; Quesada et al., 2023). Le lac reçoit aussi les eaux des rivières Azul, au nord, et Epuyén, à l'est.

Bien que ces trois lacs ne soient pas en contact direct avec des volcans et qu'ils soient protégés des volcans chiliens actifs (e.g., Calbuco, Osorno, Yate, Puyehue-Cordon Caulle) par la cordillère des Andes, plusieurs études ont démontré que les vents dominants d'ouest (i.e., les *westerlies*) à la suite d'éruptions volcaniques peuvent disperser de grandes quantités de cendres volcaniques dans les bassins versants de ces lacs, influençant ainsi leur dynamique sédimentaire (Bertrand et al., 2014 ; Serra et al., 2016 ; Salgado et al., 2022). La proximité de ces lacs avec des apports d'eau de fonte des derniers vestiges de la calotte glaciaire de Patagonie, des volcans actifs et de la LOFZ, leur confère une dynamique sédimentaire particulière et illustre leur potentiel à enregistrer les événements sismiques et volcaniques régionaux (Ariztegui et al., 2001 ; Chapron et al., 2006).

6. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET METHODE

Ce projet de maîtrise a pour **objectif principal** de documenter les séismes survenus durant l'Holocène d'après l'analyse de carottes sédimentaires récoltées dans le fjord de Reloncaví et les lacs proglaciaires Frías, Mascardi et Puelo. Pour y parvenir, trois objectifs spécifiques sont poursuivis : **1)** analyser en continu les propriétés physiques, magnétiques, géochimiques et sédimentologiques des carottes sédimentaires afin d'identifier les RDL, **2)** élaborer des modèles d'âge-profondeur pour chaque carotte sédimentaire avec l'aide de différentes méthodes (e.g., ^{14}C , ^{137}Cs , ^{210}Pb , paléomagnétisme, téphrochronologie) afin de dater les RDL et **3)** comparer l'âge des RDL avec ceux des (paléo)séismes régionaux afin de préciser l'impact géographique de ces événements et d'étudier leur récurrence durant l'Holocène.

Les carottes sédimentaires à l'étude ont été récoltées lors de différentes campagnes en 2007, 2008 et 2024. Les principaux détails sur ces campagnes et une brève description des analyses de laboratoire réalisées sur les carottes sédimentaires sont développés dans les paragraphes suivants. Les informations détaillées sur les méthodes figurent dans le Chapitre

1 (à l'exception du lac Puelo qui seront détaillées dans cette section). Le **Tableau 1** résume le travail de terrain et les analyses de laboratoires réalisés lors de cette maîtrise.

Fjord de Reloncaví

La carotte MD07-3107 (28,75 m) a été récoltée avec un carottier Calypso en 2007 dans le bassin externe du fjord de Reloncaví à bord du navire de recherche *Marion Dufresne II* (**Figure VIIA**) lors de la mission MD159/Pachiderme sur les côtes chiliennes (Kissel and the shipboard scientific party, 2007). Deux autres carottes ont été prélevées à la même localisation : les carottes CASQ MD07-3108 (7,41 m ; **Figure VIIB**) et HAPS MD07-3106 (0,30 m), étudiées par St-Onge et al. (2012). À bord du *Marion Dufresne II*, la description sédimentologique, la prise de photographies digitales et l'acquisition des propriétés physiques et magnétiques utilisant un *Multi Sensor Core Logger* (MSCL) ont été réalisées. L'analyse spectrale (couleur) et la composition géochimique des sédiments ont également été mesurées. Des images aux rayons X par tomodesitométrie (X-CT) et des mesures granulométriques sur certaines sections de la carotte ont été effectuées. Des datations au ^{14}C sur des coquilles d'organismes marins et des macrorestes végétaux retrouvés dans la carotte ont été réalisées. Afin de déterminer la composition en éléments majeurs et en éléments traces des niveaux de téphra visibles dans la carotte, des analyses ICP-MS à ablation laser (LA-ICP-MS) ont été réalisées sur des pastilles de sédiments.

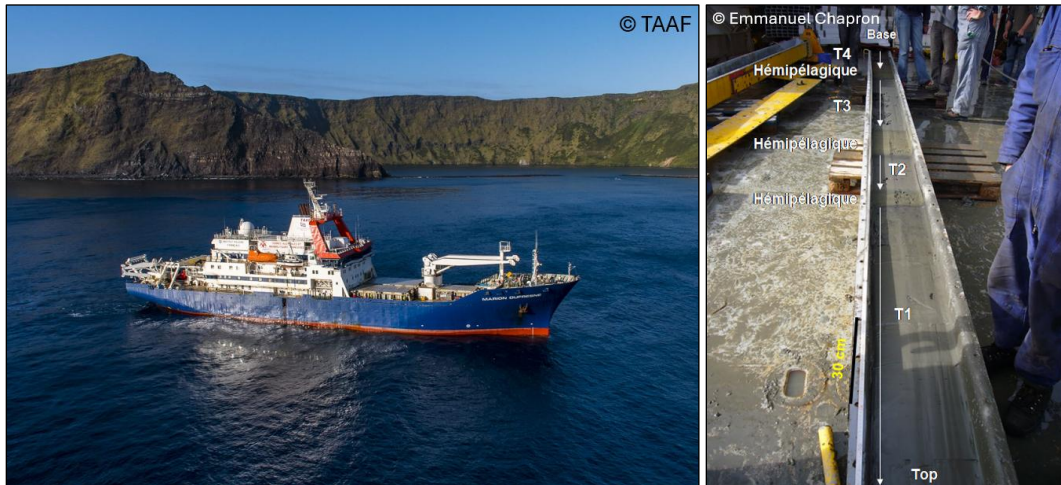


Figure VII. Le navire de recherche *Marion Dufresne II* et l'ouverture sur le pont de la carotte CASQ MD07-3108 lors de la mission MD/159 Pachiderme.

Lac Frías

La carotte FR08-3 (167 cm) a été récoltée dans la partie centrale du lac Frías avec un carottier à gravité Uwitec avec marteau ($\phi = 63$ mm) à l'été austral 2008 dans le cadre du projet ANR Escarsel. Au laboratoire, des photographies digitales et des images X-CT de la carotte ont été acquises. Les propriétés physiques, magnétiques, sédimentologiques et géochimiques de la carotte ont été mesurées avec un MSCL et un scanneur XRF Avaatech. La taille des grains d'une couche contenant des fragments pyroclastiques a été analysée à l'aide d'un granulomètre laser, tandis que la composition en éléments majeurs de ces fragments a été obtenue par spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS), couplée à un microscope électronique à balayage environnemental (EMEB).

Pour la datation, des analyses au ^{14}C ont été réalisées sur deux échantillons de macrorestes végétaux retrouvés dans la carotte et l'activité du radionucléide ^{137}Cs a été mesurée par spectrométrie gamma dans les premiers centimètres de la carotte.

Récentes campagnes aux lacs Puelo et Mascaridi

Les lacs Puelo et Mascaridi ont été échantillonnés lors de récentes missions issues d'une collaboration entre l'ISMER-UQAR (Canada) et l'IPATEC-UNCo-CONICET

(Argentine). La mission au lac Puelo en mars 2024 a permis de récolter cinq carottes sédimentaires. Les carottes LP24-01 (46 cm), LP24-02 (22 cm), LP24-03 (90 cm), LP24-04 (90 cm) ont été récoltées en face du delta Turbio (**Figure VIIIA-C**) et la carotte LP24-05 (94 cm) a été récoltée en face du delta Epuyén. La carotte Masc-90424 (51 cm) a été récoltée face au delta Manso du lac Mascarcardi en avril 2024. Toutes ces carottes ont été prélevées avec un carottier à gravité Uwitec avec marteau ($\phi = 90$ mm).

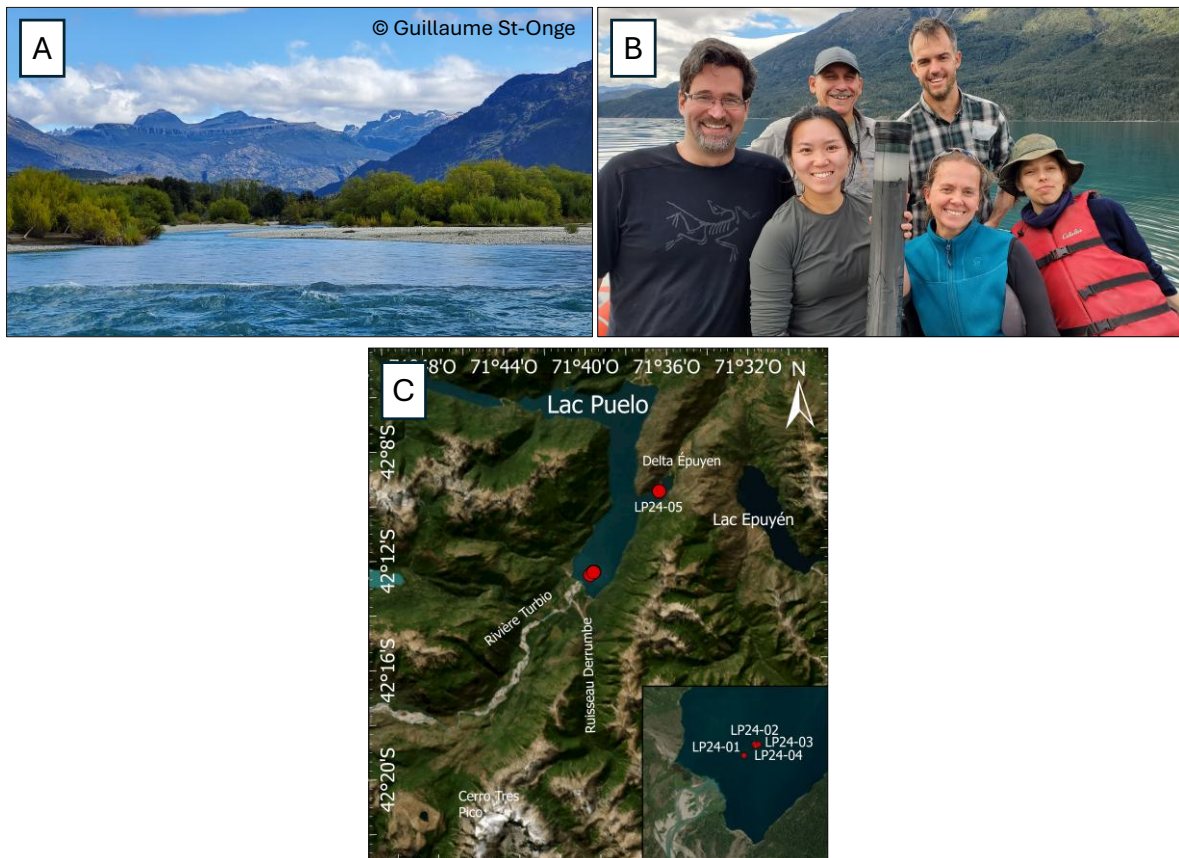


Figure VIII. Campagne de carottage au lac Puelo. A) Photo du delta Turbio, B) l'équipe sur le terrain après la récolte de la première carotte sédimentaire et C) localisation des carottes sédimentaires récoltées durant la mission.

Ces carottes sédimentaires ont été expédiées à l'ISMER afin d'y être analysées. Le banc d'analyses MSCL de GEOTEK a été utilisé afin de mesurer les propriétés physiques et magnétiques des carottes sédimentaires (*whole core*). Les propriétés magnétiques, spectrales et géochimiques ont été mesurées simultanément sur les carottes scindées en deux sur la

longueur (*split core*) avec un capteur Bartington MS2E, un spectrophotomètre Minolta CM-2006d et un analyseur XRF Olympus Innov-X Delta portable, respectivement (**Figure IXA-B**). La granulométrie des sédiments a également été obtenue avec un granulomètre laser de Malvern Panalytical Mastersizer 3000. Les différents paramètres granulométriques et statistiques, tels que le classement des grains (*sorting*) et le D_{90} , ont été calculés avec la feuille GRADISTAT (Blott et Pye, 2001). Le CAT-scan X-CT SOMATOM Definition AS de Siemens de l'Institut national de recherche scientifique (INRS-ETE) à Québec a été utilisé afin de visualiser les carottes en trois dimensions et d'identifier des structures sédimentaires d'intérêt. Les données issues de ces mesures au X-CT ont été traitées avec Matlab afin d'extraire le *CT number*. De plus, des analyses de la teneur en isotope stable $\delta^{13}\text{C}$, en carbone organique ($\%C_{\text{org}}$) et en azote total ($\%N_{\text{tot}}$) ont été réalisées au laboratoire de radiochronologie du GEOTOP à Montréal.

Pour la datation, des analyses ^{14}C ont été réalisées sur des macrorestes végétaux retrouvés dans les carottes sédimentaires. La graphitisation des échantillons a été réalisée au Laboratoire de géochronologie du Centre d'études Nordiques de l'Université Laval alors que la datation du ^{14}C par spectrométrie de masse avec accélérateur (*Accelerator Mass Spectrometry* ; AMS) a été effectuée à l'Université de Californie Irving aux États-Unis. Des mesures de l'activité du ^{137}Cs ont également été effectuées au laboratoire souterrain de radiochronologie (compteur gamma) à la station aquicole de l'ISMER. De plus, des *u-channels* (i.e., des tubes de plastique de section carrée 2 x 2 cm) ont été prélevés au centre des carottes sédimentaires afin de réaliser des mesures paléomagnétiques. Ces dernières ont été réalisées avec un magnétomètre cryogénique SRM-755 de 2G Enterprises afin d'obtenir l'inclinaison, la déclinaison, l'aimantation naturelle rémanente (NRM) et l'aimantation rémanente anhystérétique (ARM). Ces mesures pourraient permettre de préciser le cadre chronostratigraphique des carottes sédimentaires (Stoner & St-Onge, 2007 ; Lisé-Pronovost et al., 2013). Pour finir, les grains d'une couche de téphra identifiée au sommet de la carotte LP24-05 (i.e., fragments de verres volcaniques et de pierres ponces) ont été observés dans un premier temps au microscope binoculaire et au microscope électronique à balayage (MEB) afin de confirmer leur origine volcanique (**Figure IXC**). Ensuite, la composition en éléments

majeurs des grains a été obtenue par spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS), couplée au microscope électronique à balayage (MEB) à l'ISMER.

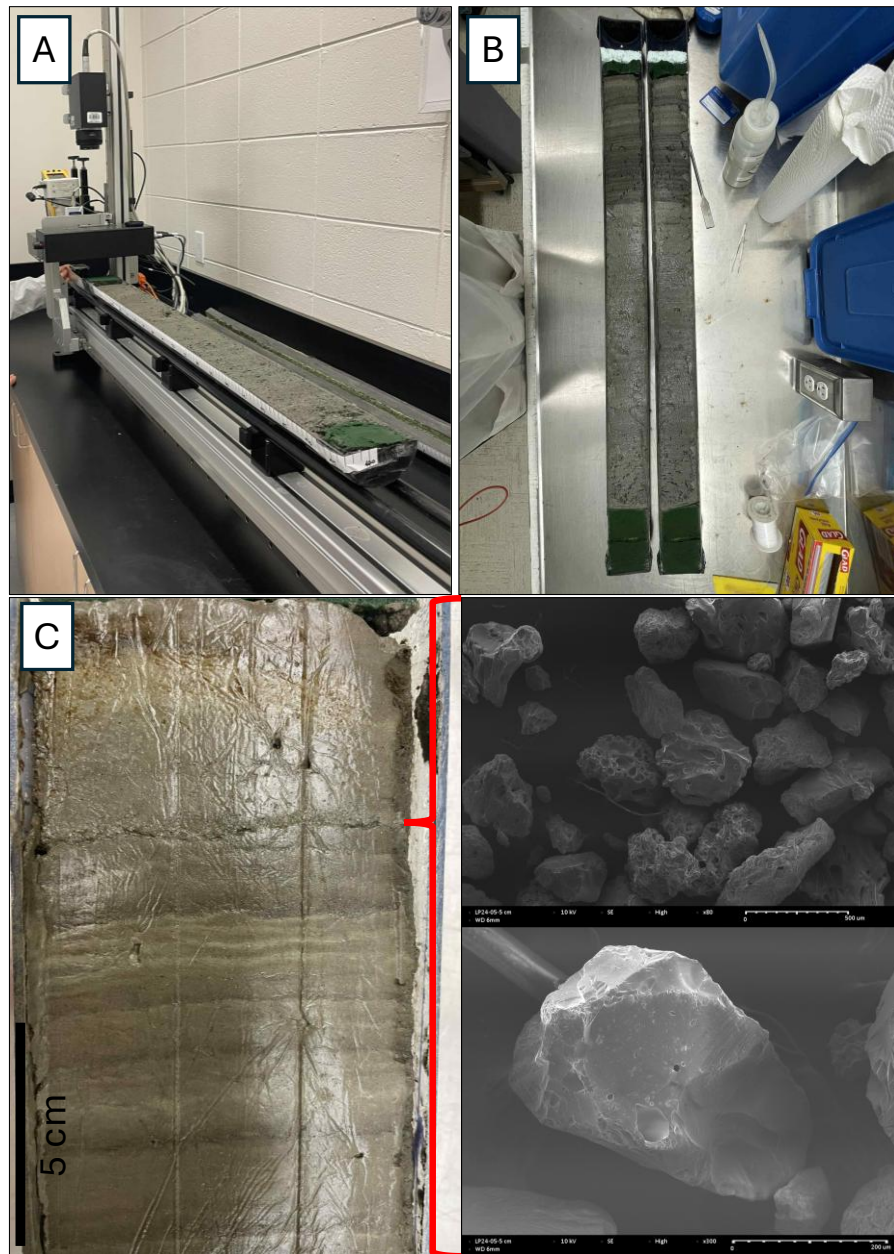


Figure IX. Analyses de laboratoire sur les carottes des lacs Mascardi et Puelo. A) Mesure en ligne sur le banc d'analyses MSCL, B) découpe de la carotte LP24-05 du lac Puelo où l'on observe un changement de couleur drastique et C) observation du téphra identifié au sommet de la carotte LP24-05 au microscope électronique à balayage (MEB) (© Naomi Cretton, 2024).

X : travail réalisée par Naomi Cretton (assistée du 4 au 25 septembre 2024 par Lucia Dominguez, étudiante au doctorat à l'IPATEC, lors de son stage à l'ISMER)

- : travail non réalisé

[illegible]

7. ORGANISATION DU MEMOIRE

Le chapitre 1 de ce mémoire porte sur l'étude des carottes sédimentaires récoltées dans le fjord de Reloncaví et les lacs Frías et Mascardi. Il sera soumis à la revue scientifique internationale *Marine Geology* à la suite du dépôt final de ce mémoire de maîtrise.

Les résultats d'analyse des carottes sédimentaires récoltées dans le lac Puelo produits à l'ISMER et dans d'autres laboratoires au Québec seront interprétés dans le cadre de la thèse de doctorat de Lucía Domínguez. Cette dernière, qui est coautrice de l'article du Chapitre 1, a participé aux missions de carottage aux lacs Puelo et Mascardi au printemps austral 2024 ainsi qu'aux analyses de laboratoire sur ces carottes sédimentaires dans le cadre d'un stage de recherche du 4 au 25 septembre 2024 à l'ISMER.

Les données issues de ce projet de maîtrise seront archivées dans la base de données PANGAEA (<https://www.pangaea.de/>).

CHAPITRE 1
HOLOCENE SUBDUCTION EARTHQUAKE-TRIGGERED TURBIDITES
FROM THE RELONCAVÍ FJORD (CHILE) AND THE PROGLACIAL LAKES
FRÍAS AND MASCARDI (ARGENTINA)

Naomi Cretton^a, Guillaume St-Onge^a, Gustavo Villarosa^c, Anthony Foucher^d, Lucía Domínguez^c, Giuseppe Siani^e, Sandor Mulsow^f, Pierre Francus^g, Daniel Ariztegui^h & Emmanuel Chapron^b

^a Institut des sciences de la mer (ISMER), Canada Research Chair in Marine Geology, Université du Québec à Rimouski, GEOTOP & Québec Océan, Rimouski, Canada.

^b Géographie de l'environnement (GEODE), Université de Toulouse Jean Jaurès, Toulouse, France.

^c Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC), Universidad Nacional del Comahue-CONICET, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.

^d Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), CEA-CNRS-UVSQ, Gif sur Yvette, France.

^e Laboratoire Géosciences Paris-Saclay (GEOPS), Université Paris-Saclay, Orsay, France.

^f Laboratorio Estudios Espaciales y Temporales, Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas (ICML), Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

^g Centre Eau Terre Environnement (ETE), Institut national de la recherche scientifique & GEOTOP, ville de Québec, Canada.

^h Department of Earth Sciences, University of Geneva, Geneva, Switzerland.

RESUME EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

La région centrale-sud du Chili est caractérisée par un risque sismique, tsunamigénique et volcanique très élevé et a notamment été l'hôte du séisme historique de Valdivia de 1960 (M_w 9,5) et de ses prédécesseurs, les séismes de 1837, 1737 et 1575. Des archives sédimentaires paléosismiques sont nécessaires dans cette région afin d'améliorer notre compréhension de l'impact de ces événements catastrophiques récurrents au cours de l'Holocène, comme en témoignent de nombreuses études paléosismiques menées au cours des dernières décennies. Cette étude présente l'analyse de carottes sédimentaires longues et courtes provenant de trois bassins marins et lacustres situés au nord de la Patagonie : le fjord Reloncaví (41,7°S) au Chili et les lacs proglaciaires argentins Frías (41°S) et Mascardi (41,3°S). Les profils sismiques et une analyse multi-traceurs de la carotte Calypso piston MD07-3107 (29 m), récoltée dans le fjord Reloncaví révèlent la présence de 17 mégaturbidites et turbidites déclenchées par des séismes au cours des 8 700 dernières années cal BP. Une comparaison de ce nouvel enregistrement paléosismologique avec d'autres études paléosismologiques régionales indique que le fjord aurait préservé des traces de 13 séismes majeurs ayant provoqué la rupture complète du segment tectonique de Valdivia, dont six durant les 2 000 dernières années, permettant de suggérer une récurrence de $\sim 342 \pm 153$ ans pour cette période. La sédimentation de mégaturbidites dans le bassin distal du fjord au cours des 2 000 dernières années pourrait être reliée à des changements hydrologiques et sédimentaires affectant la stabilité du delta du Puelo, située le long de la LOFZ. De plus, des dépôts sédimentaires associés au séisme de 1960 ont été identifiés dans les carottes prélevées dans les lacs Frías et Mascardi, confirmant et étendant l'impact de ce séisme historique sur le versant argentin de la cordillère des Andes. De plus, les turbidites identifiées dans le lac Frías pourraient suggérer que ce lac a conservé des traces des séismes de 1737 et 1748, contribuant ainsi à préciser la limite sud de ces événements peu documentés. Cette étude illustre ainsi le potentiel de ce fjord et de ces lacs à fournir des archives sédimentaires fiables pour l'étude de la sismicité régionale.

ABSTRACT

South-central Chile is characterised by a high seismic, tsunamigenic, and volcanic risk and was the host of the AD Mw 9.5 1960 Great Chilean earthquake and its historical predecessors, the AD 1837, 1737, and 1575 earthquakes. Paleoseismic sedimentary archives are required in this region to improve our understanding of the impact of these catastrophic events, proven to be recurrent during the Holocene, as evidenced by numerous paleoseismic studies over the past few decades. This study presents long and short sediment cores from three marine and lacustrine basins located in northern Patagonia: the Reloncaví Fjord (41.7°S) in Chile and the Argentine proglacial lakes Frías (41°S) and Mascardi (41.3°S). Seismic profiles and a multiproxy analysis on the ~29-m long Calypso piston core MD07-3107 recovered from the Reloncaví Fjord reveal the presence of 17 earthquake-triggered (mega-)turbidites over the last 8,700 cal BP. A comparison of this new Holocene paleoseismic record with regional paleoseismological studies indicates that the fjord preserved traces of 13 earthquakes causing the full rupture of the Valdivia tectonic segment, with six during the last two millennia, yielding a recurrence of $\sim 342 \pm 153$ years (1σ) for this period. The formation of megaturbidites over the last 2,000 years in the distal basin of the fjord could be related to hydrological and sedimentary changes affecting the stability of the Puelo delta, which lies along the trend of the LOFZ. Furthermore, sedimentary deposits associated with the AD 1960 Valdivia earthquake have been identified in cores from lakes Frías and Mascardi, confirming and extending the impact of this historical earthquake on the Argentine side of the Andes. In addition, turbidites identified in Lake Frías could suggest that this lake has preserved traces of the AD 1737 and 1748 earthquakes, thus helping to specify the southern extent of these poorly documented events. These results highlight the potential of these lakes to provide reliable sedimentary archives for studying regional seismicity.

1. INTRODUCTION

The south of the Chilean subduction zone has experienced several historical earthquakes in the last centuries, including the AD 1960 Valdivia “Great Chilean” megathrust earthquake and its historical predecessors, the AD 1837, 1737 and 1575 (Lomnitz, 2004; Cisternas et al., 2017a). The giant AD 1960 earthquake struck South Central Chile with a moment magnitude (M_w) of 9.5, making it the strongest earthquake ever recorded instrumentally. It caused a full rupture of the Valdivia tectonic segment over 1,000 km (Cifuentes, 1989) and the main seismic shock, in combination with the following tsunami, caused widespread damage and loss of lives across the Pacific Ocean, notably in Hawaii (Eaton et al., 1961) and Japan (Katô et al., 1961). In Chile, this large earthquake caused over 2,000 fatalities and catastrophic damages (Plafker & Savage, 1970). Studying earthquakes timing is crucial to better understand their mechanisms to assess the seismic hazard in high-risk areas, such as the west coast of South America (Petersen et al., 2018), where the Peru-Chile subduction margin is located.

From a geological perspective, seismic events can disrupt marine and lake environments by triggering the rapid deposition of sediment, commonly known as rapidly deposited layers (RDL), such as turbidites. Paleoseismological studies based on earthquake-triggered sedimentary deposits identified in such environments have been conducted in multiple locations around the world, including the Japan trench (Ikehara et al., 2016; Strasser et al., 2024), the Cascadia margin (Goldfinger et al., 2012; Morey & Goldfinger, 2024), Alaska (Fortin et al., 2019; Praet et al., 2022), eastern Canada (St-Onge et al., 2004; Lajeunesse et al., 2017; Brooks et al., 2020; Mérindol et al., 2022), the Hikurangi subduction margin (Pizer et al., 2024; Howarth et al., 2021), the Lesser Antilles (Seibert et al., 2024), the Alps (Strasser et al., 2006; Guyard et al., 2017) and Turkey (Gastineau et al., 2024), making it a reliable method for reconstructing seismic events. In South Central Chile, several studies have highlighted the potential of studying continental lakes (e.g., Chapron et al., 2007; Bertrand et al., 2008b; Villarosa et al., 2009; Van Daele et al., 2015; Moernaut et al., 2018), fjords (e.g., Chapron et al., 2006; St-Onge et al., 2012; Wils et al., 2018) and coastal marshes (e.g., Cisternas et al., 2005; 2017b) to recover deposits triggered by seismic and

tsunamigenic events, in order to decipher their cyclicity and mechanisms. These studies have shown that the AD 1960 Valdivia earthquake and its predecessors are part of a long series of megathrust earthquakes that struck the area. The longest paleoseismic record available along the Valdivia tectonic segment is found in its southern part in the Aysén Fjord (45.5°S) and spans the last 9,000 years (Wils et al., 2018; 2020). However, on the northern part of the segment, apart from the seismo-stratigraphic record from Lake Puyehue that spans the last 10,000 years (Moernaut et al., 2007), the longest record is found at Lake Huelde (42.6°S) reaching 5,500 years (Kempf et al., 2017), almost half as long as its southern counterpart.

The aim of this study is therefore to provide a Holocene long paleoseismic record in the northern part of the Valdivia tectonic segment by analyzing the ~29-m long sediment core MD07-3107 collected in the outer basin of the Reloncaví Fjord. This core has been retrieved at the same location as core MD07-3108 presented in St-Onge et al. (2012), that recorded three of the major historical earthquakes (i.e., AD 1960, 1837 and 1575), as well as a prehistoric tsunamigenic earthquake in AD ~1280-1390 (Cisternas et al., 2005). By analysing physical, magnetic and sedimentological properties of core MD07-3107 and constructing an age-depth model based on radiocarbon dating, we extend the paleoseismic record in the Reloncaví Fjord to the last 8,700 cal BP. This study also presents the analysis of short lacustrine sediment cores collected from the Argentine proglacial lakes Frías and Mascardi, which allows the identification of RDL that can be traced back to the AD 1960 Valdivia earthquake and potentially the other historical subduction earthquakes.

2. REGIONAL SETTING

2.1 Tectonic setting and regional paleoseismicity

The tectonic activity along the coast of Chile is controlled by the oblique subduction of the Nazca tectonic plate beneath the South American plate, forming the Peru-Chile trench (**Figure. 1A**). The Nazca plate is also in extension with the Antarctic plate, forming the Chile Rise. The three plates merged at the Chile Triple Junction (CTJ), leading to the formation of the active Liquiñe-Ofqui fault zone (LOFZ) that extends over 1,000 km north of the CTJ (Cembrano et al., 1996). This large fault system is characterised by a high seismic risk and

strong volcanic activity (Cembrano et al., 1996; Vargas et al., 2013). A crustal seismic swarm reaching over 7000 seismic events (max Mw 6.2) struck the LOFZ vicinity in Aysén Fjord between January and June 2007, illustrating the seismic activity within this fault system (Legrand et al., 2011; Van Daele et al., 2013; Vanneste et al., 2018)

In south-central Chile, this subduction margin is separated in two tectonic segments (Melnick et al., 2009): the Maule segment ($\sim 34\text{--}38^\circ\text{S}$), that ruptured during the recent 2010 Mw 8.8 Concepción earthquake (Lario et al., 2016) and the Valdivia segment ($\sim 38\text{--}46^\circ\text{S}$), which is known to have ruptured over 1,000 km during the historical May 21-22, Mw 9.5 1960 Valdivia earthquake and recently in 2016, during the Mw 7.6 Melinka earthquake, just south of Chiloé Island (Lange et al., 2017). The Great Chilean 1960 earthquake was also followed by a large Pacific-wide tsunami and an eruption of the Puyehue Cordon-Caulle volcanic complex on May 24 (Lara et al., 2004; Watt et al., 2009a). During the historical period (i.e., the last 500 years), three other earthquakes preceded the AD 1960 event and the rupture of the Valdivia tectonic segment: in AD 1837 ($M_w \leq 8$), 1737 ($M_w \sim 7.5$) and 1575 (Lomnitz, 2004). While the 1737 and 1837 earthquakes are suspected to have caused partial ruptures of the northern and southern parts of the Valdivia tectonic segment respectively (Cisternas et al., 2017a), the 1575 earthquake is suspected to have caused a full rupture just like the 1960 Great Chilean earthquake. This is supported by the similar damages that induced the 1575 earthquake, which was also followed by a large tsunami along the Chilean coast and a volcanic eruption of the Osorno volcano (Lomnitz, 2004; Bertrand et al., 2008a), as well as a serie of sedimentary evidence identified throughout the tectonic segment (St-Onge et al., 2012; Wils et al., 2020), just like the 1960 event. Furthermore, while historical documents confirm that a tsunami followed the 1837 earthquake (Lomnitz, 2004), it is only recently that a study along the Chaihuín coastal marsh revealed sedimentary evidence of a tsunami following the 1737 earthquake (Hocking et al., 2021).

Over the last 25 years, several studies have examined paleoseismic records along the Valdivia tectonic segment in different environmental settings to better understand the recurrence of the (paleo)earthquakes in the region. Among the short records ($< 2,000$ years) are the tsunami deposits from buried soils in Chaihuín (39.9°S), Maullín (41.6°S), Chucalén (41.8°S) and Cocotué (42°S) coastal marshes (respectively Hocking et al., 2021; Cisternas et

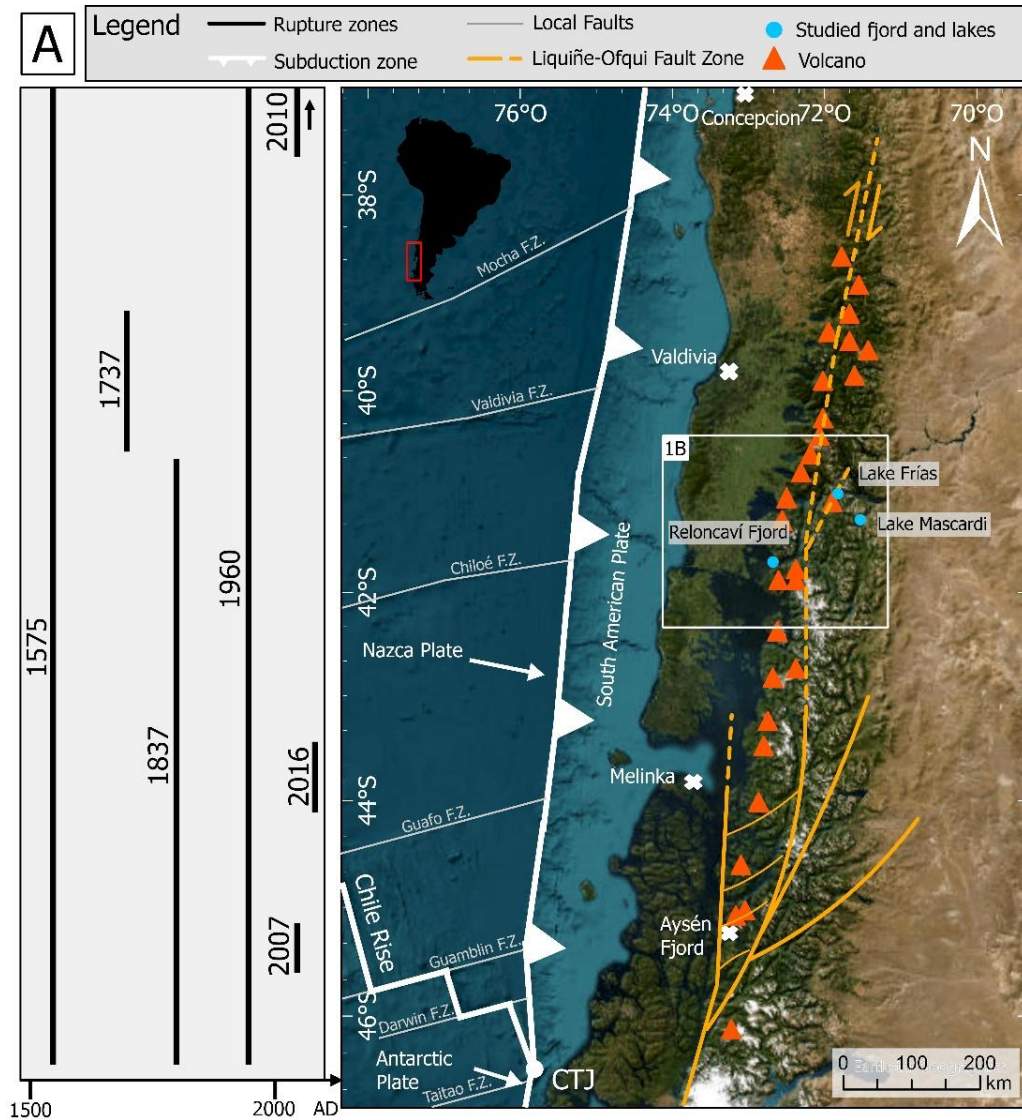
al., 2005; Garrett et al., 2015; Cisternas et al., 2017b) and the megaturbidites in Reloncaví Fjord (41.7°S) (St-Onge et al., 2012). Medium-length regional paleoseismic records include those from tsunami deposits in coastal lakes, Huelde (42.6°S) (Kempf et al., 2017) and Cucao (42.6°S) (Kempf et al., 2020) on the Pacific side of Chiloé Island, spanning the last 5,500 and 4,300 years, respectively. In addition, lacustrine turbidites found in Lake Riñihue (39.8°S) and Lake Calafquén (39.5°S) recorded 4,700- and 3,500-years worth of seismic history, respectively (Moernaut et al., 2018). A Holocene long record was recovered in Aysén Fjord (45.5°S), in the southern part of the segment, spanning the last 9,000 years (Wils et al., 2018; 2020). The only Holocene paleoseismic record in the northern part of the segment is from Lake Puyehue (40.6°S) where up to 9 earthquake-triggered mass-wasting deposits were identified on seismic profiles over the past 10,000 years (Moernaut et al., 2007).

These paleoseismic records were previously compiled and correlated in different studies, which suggested that several megathrust earthquakes have caused the full rupture of the Valdivia tectonic segment, as occurred during the AD 1960 earthquake, during the last two millennia, in AD ~1319, ~1127, ~745 and ~350 (Cisternas et al., 2005; Moernaut et al., 2018; Kempf et al., 2020; Wils et al., 2020). Partial and cascading ruptures events were also inferred in AD ~1465, ~590, ~100 and ~15 (Wils et al., 2020). These multiple seismic events, which occurred through different rupture modes (i.e., full-, northern-, southern-, cascading-, partial-rupture) along the Valdivia tectonic segment, demonstrate the complexity of the timing and mechanisms of such events in this part of South America.

2.2 Volcanic setting

The Peru-Chile subduction zone is also part of the Circum-Pacific volcanic Belt, specifically the southern volcanic zone (SVZ, 33°-46°S) which includes ~60 very active volcanoes (Stern, 2004; **Erreur! Source du renvoi introuvable.A**). The central and southern parts of the SVZ (38°-46°S) hosts some of the most Holocene active volcanoes, in the region, including Puyehue, Cordon-Caulle, Calbuco, Michinmahuida, Chaitén and Hudson (Stern, 2004; Naranjo & Stern, 2004; Watt et al., 2011; Martinez Fontaine et al., 2021). Several tephrochronology studies along the SVZ provide a robust framework for constraining the timing of these volcanic eruptions (e.g., Villarosa et al., 2006; Watt et al., 2011, 2013; Fontijn

et al., 2014, 2016; Naranjo et al., 2017; Alloway et al. 2017, 2022; Martínez Fontaine et al., 2021; Romero et al., 2021). These records have recently been compiled in the BOOM! Database (Martínez Fontaine et al., 2023). Beyond their stratigraphic significance, the high volcanic activity of this zone significantly impacts the sedimentation of earthquake-triggered deposits, as marine and lake basins are highly sensitive to volcanic material inputs in their catchment area, which affects their sedimentary dynamic (Bertrand et al., 2008b; 2014).



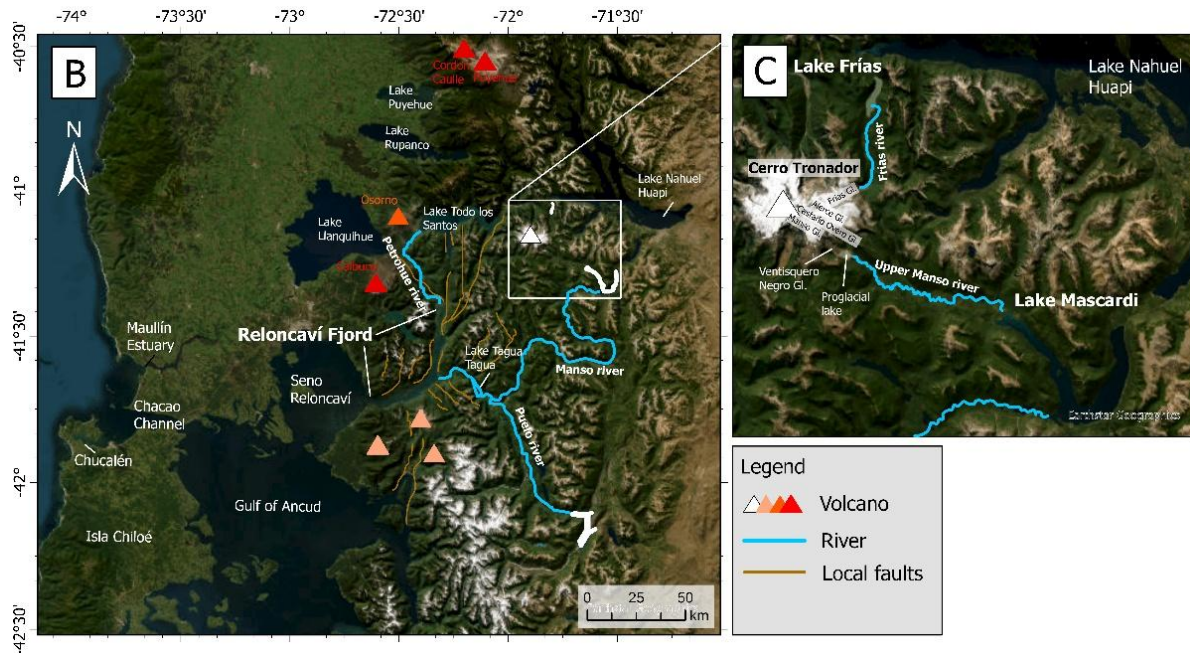


Figure. 1 A) Tectonic setting of the study area. Left panel indicates the approximate rupture zones of the historical earthquakes along the Valdivia tectonic segment according to historical record and paleoseismic studies (Lomnitz, 2004; St-Onge et al., 2012; Moernaut et al., 2018; Wils et al., 2020). Right panel illustrates the tectonic and volcanic setting of the study area. B) Area showing the geomorphological and hydrological setting in the vicinity of the studied fjord and lakes. The main river courses are illustrated by blue lines, the nearby volcanoes by triangles in shades of orange representing the level of activity (pale being less active and dark being recently active; Martinez Fontaine et al., 2023) and the local faults surrounding the fjord by brown lines (SERNAGEOMIN, 2003). C) Zoomed area showing the Frías River and Upper Manso River draining the glacial tongues of the Cerro Tronador into Lake Frías and Lake Mascardi respectively.

2.3 Reloncaví Fjord and its potential for paleoseismic reconstruction

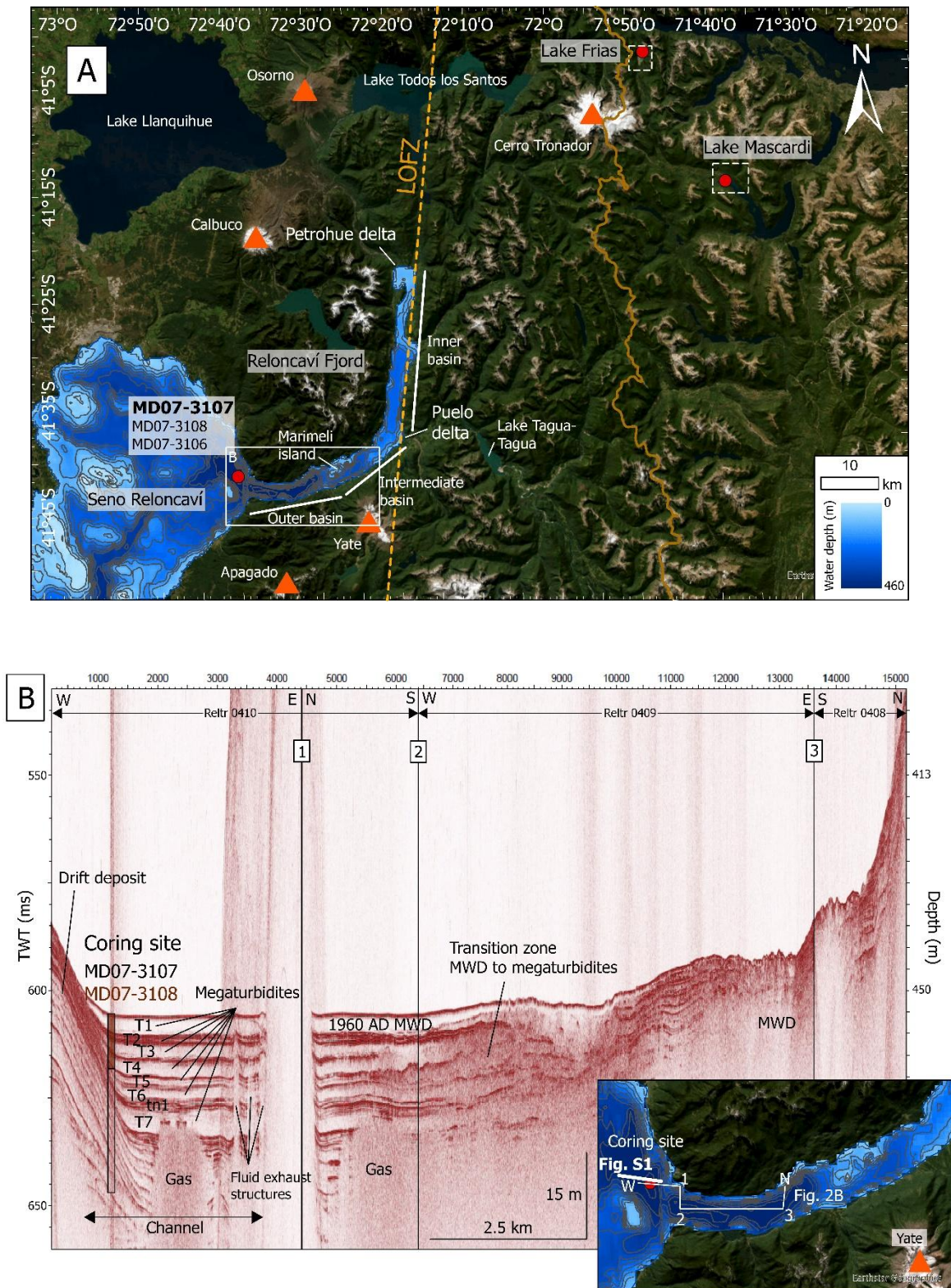
Located in the region of Los Lagos in Chilean northern Patagonia, a geomorphologically and tectonically active zone, the Reloncaví Fjord (41.7°S) is a westward-curving glacial valley ~55-km long and < 3-km wide and has a superficiality of ~700 km² (**Figure. 1B**) (Valle-Levinson et al., 2007). The large watershed of the fjord, that drains multiples lakes, glaciers and volcanoes, culminates at the Cerro Tronador (3554-m a.s.l), a

dormant, ice-capped volcano located at the frontier between Chile and Argentina. The fjord is directly fed by tributaries of the large Puelo River to the east, which has a catchment area of 8,900 km², with annual mean discharge of 650 m³/s, reaching nearly 900 m³/s in summer (Valle-Levinson et al., 2007; Lara et al., 2008). The Petrohue River fed the fjord to the north with annual mean discharge of 255 m³ s⁻¹ (Castillo et al., 2016). The Reloncaví Fjord drains the Chilean lakes Todos los Santos and Tagua-Tagua by the Petrohue River and Puelo River, respectively. The fjord also drains two Argentine lakes: Lake Puelo, from which the Puelo River originates, and Lake Mascaradi, via the Manso River, which joins the Puelo River just upstream of Lake Tagua-Tagua (**Figure. 1B**).

The fjord is divided into three basins separated by sills. The inner basin spans from the Petrohue delta to the Puelo delta, the middle basin is bounded by the Puelo delta and the sill formed by the Marimeli Island, and the outer basin stretches from the Marimeli Island to the sill present at the entrance of Seno Reloncaví (**Figure. 2A**). Seno Reloncaví is a bay subjects to the influence of strong semi-diurnal tides, reaching fluctuations of 8 m (Castillo et al., 2012) and propagating into the fjord via the outer basin in the form of a low velocity tidal current <10 cm s⁻¹ (Valle-Levinson et al., 2007). St-Onge et al. (2012) previously suggested that this tidal current is at the origin of strong bottom currents shaping the seabed of the outer basin of the fjord with a layered channel levee (i.e., drift deposit; **Figure. 2B**). This drift deposit may have increased the sedimentation rate in the outer basin, thereby contributing to the preservation of turbidites originating from the mass-wasting deposits (MWD) from the Puelo delta (Chapron et al., 2006; St-Onge et al., 2012; Viel et al., 2015; **Figure. 2B**).

The Reloncaví Fjord was previously studied for paleoseismology by St-Onge et al. (2012) who reconstructed earthquakes during the last 600 years from the CASQ core MD07-3108 (7.41-m) (**Figure. 2B**). In total, four megaturbidites and a tsunami deposit were identified and associated respectively to the AD 1960 Valdivia earthquake, the 1837, the 1575 (and the associated tsunami), as well as a prehistoric tsunamigenic earthquake occurring in AD ~1280-1390 recorded in the nearby Maullín estuary coastal marsh (Cisternas et al., 2005). Up to three additional megaturbidites were identified by acoustically transparent seismic facies (T5, T6 and T7 in **Figure. 2B**), highlighting the potential of this fjord

sedimentary infill to preserve a long serie of earthquake-triggered deposits (Chapron et al., 2006 ; St-Onge et al., 2012).



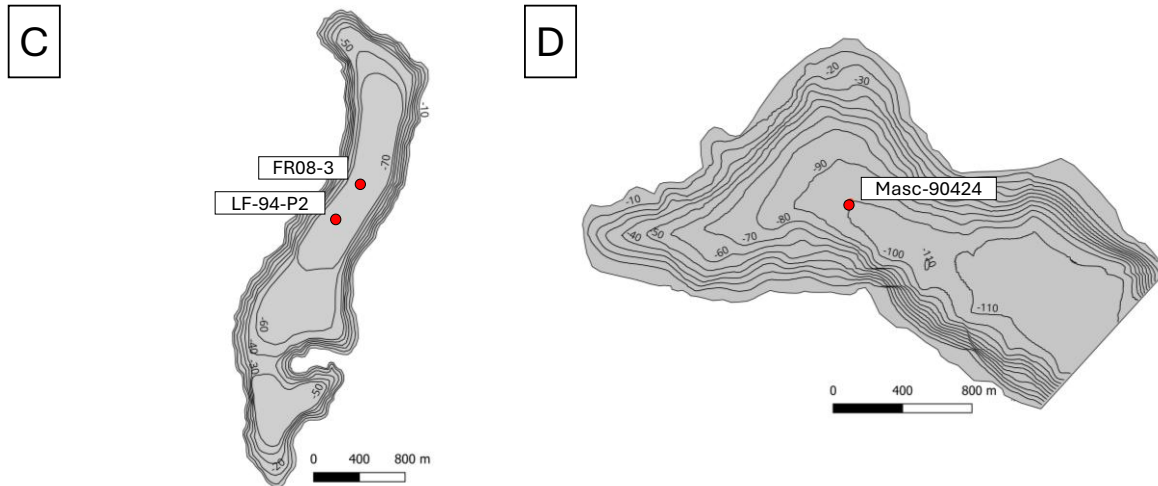


Figure. 2 A) Bathymetric map of Seno Reloncaví and Reloncaví Fjord from the GEBCO database 2024. B) 3.5 kHz pinger seismic profile in the outer basin of Reloncaví Fjord shows the coring sites of HAPS core MD07-3106 (40-cm long, not shown), CASQ core MD07-3108 (7.41-m long) and Calypso piston core MD07-3107 (28.75-m long) (modified from Viel et al., 2015). C) Location of core FR08-3 and core LF-94-P2 on a bathymetric map of Lake Frías (modified from Ariztegui et al., 2007). D) Location of core Masc-90424 on a bathymetric map of the Manso delta of Lake Mascarcardi acquired in 2024.

On the eastern side of the Andes, the proglacial lakes Frías (41°S) and Mascarcardi (41.3°S) were formed by the retreat of the Patagonian Ice Sheet during the Late Pleistocene (Tatur et al., 2002). Lake Frías (790 m a.s.l) is a 4-km-long, 1-km-wide and 75-m deep proglacial lake tributary of the massive Lake Nahuel Huapi (Ariztegui et al., 2007; 2008; **Figure. 1B**). Lake Frías is also fed by a tongue of the Cerro Tronador ice cap, the Frías glacier, whose meltwater flows into the Frías River and empties in the Frías delta (**Figure. 1C**). The sedimentary infill of Lake Frías is composed of clastic varves, according to the classification of Zolitschka et al. (2015), which illustrate the fluctuations of the Cerro Tronador under climate forcing during the Little Ice Age (Ariztegui et al., 2007). In addition, traces of the AD 1960 Valdivia earthquake were previously found in the sediment core LF-94-P2 (**Figure. 2C**) recovered from Lake Frías in the form of a 4-cm thick organic rich layer containing sediment remobilisation evidence, such as branches and leaves debris (Chapron et al., 2006).

Lake Mascardi (790 m a.s.l) is a U-shaped proglacial lake with a surface area of ~30 km² and a maximum depth of 215 m (Ariztegui et al., 2001; 2008). The outlet of Lake Mascardi is flowing through the Manso River which flows westward to join the Puelo River in Chile that discharges into the Reloncaví Fjord (**Figure. 1B**). Lake Mascardi receives meltwater at a rate of ~11 m³ s⁻¹ (Pasquini et al., 2008) through its upper Manso River from three of the Cerro Tronador glaciers, i.e., the Alerce, Castaño Overo and Manso glaciers (Bianchi & Ariztegui, 2011; **Figure. 1C**). One of the terminal tongues of the Manso glacier, known as the Ventisquero Negro, covered with a thick layer of sediment that gives it its distinctive dark colour, has been retreating since the last decades forming a lake at its front, dammed by a terminal moraine (Worni et al., 2012). In 2009, the terminal moraine failed, causing a glacial lake outburst flood (GLOF) that released the entire lake volume of 10 x 10⁶ m³ into the Manso valley in just three hours (Worni et al., 2012; Moreiras et al., 2024). Additionally, the sediment infill of Lake Mascardi has been previously studied using high-resolution seismic profiling and piston cores recovered in the Manso arm and the lake outlet (Ariztegui et al., 1997; 2001; 2008). These previous studies pinpoint the capacity of this lake to receive meltwater from the Cerro Tronador activity via its Manso arm and thus, record climate episodes in the Southern Hemisphere, such as the Huelmo-Mascardi cold event and the Late glacial / Holocene transition.

These two proglacial lakes have thus the potential to preserve sedimentary evidence of earthquakes and other geohazards, such as GLOFs which are common in the Andean region, in response to glacier melting under climate warming (Moreiras et al., 2024; Colavitto et al., 2024). Multiple lakes in the region recorded sedimentary traces of the AD 1960 earthquake in both Chile and Argentina: a mega flood deposit in Lake Puyehue (Chapron et al., 2006; 2007), a megaturbidite in Lake Nahuel Huapi (Chapron et al., 2006; Villarosa et al., 2009) as well as thick proximal deposits and fine distal turbidites in lakes Rupanco and Llanquihue (Van Daele et al., 2015). In addition, these lakes located at the foot of the Argentine Andes are prone to record volcanic eruptions in their basins or watersheds, as the prevailing southern westerly winds drive the plume eastward, subjecting this area to tephra fallout events, affecting sedimentation processes, the environment and populations (Bertrand et al., 2014; Salgado et al., 2022).

3. METHOD

3.1 Geophysical data and core sampling

The Reloncaví Bay and Fjord sedimentary infill were mapped over more than 250 km using the 1 kHz Centipede sparker source and the 3.5 kHz Geopulse Pinger source of the Renard Center of Marine Geology (Ghent University, Belgium) in 2004 on board the Chilean R/V Don Este (Chapron et al., 2006). A large serie of seismic profiles were presented in St-Onge et al. (2012) and Viel et al. (2015). The Reloncaví Fjord was then sampled in February 2007 on board the R/V Marion Dufresne II during the MD/159 Pachiderme Expedition as part of the IMAGES XV (International Marine Past Global Change Study) program (Kissel & the shipboard scientific party, 2007). During this expedition, the core MD07-3107 (~29-m) was retrieved with a giant piston Calypso corer from the outer basin (**Figure. 2A ; Table 1**) together with core MD07-3108 (7.41-m), collected with a CASQ corer and core MD07-3106 (0.30-m) collected with a HAPS surface corer, which allows the water-sediment interface to be preserved. The locations of these sediment cores were determined during the mission based on the 2004 seismic profiles and using a 3.5 kHz Chirp subbottom profiler on board. Cores MD07-3106 and MD07-3108 were previously studied by St-Onge et al. (2012).

On the Argentine side, short lacustrine sediment cores were collected in the proglacial lakes Frías and Mascardi. Core FR08-3 (**Table 1**) was collected in the distal part of Lake Frías (**Figure. 2C**) using a UWITEC gravity corer with hammer (63-mm diameter) during the Escarsel mission in the austral summer 2008. The core location was selected based on 11 km of seismic profiles acquired with a 23 kHz analog subbottom profiler.

Core Masc-90424 (**Table 1**) was collected in the Manso arm of the Lake Mascardi (**Figure. 2D**) using a UWITEC gravity corer with hammer (90-mm diameter) during the austral spring 2024 by the Grupo de Estudios Ambientales (GEA) - Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC) from CONICET-UNCo in San Carlos de Bariloche (Argentina). Bathymetric data of the Manso arm of the lake were acquired during the same fieldwork using a Garmin GPSMAP 420s echosounder.

Table 1 Identification of the cores presented in this study

Core	Location	Date	Latitude (°S)	Longitude (°W)	Water depth (m)	Core length (cm)
MD07-3107	Reloncaví Fjord	2007	41°41.995'	072°40.094'	458	2875
FR08-3	Lake Frías	2008	41°03.604'	071°47.879'	70	164
Masc-90424	Lake Mascardi	2024	41°15.930'	071°38.123'	98	51

3.2 Sedimentological analyses and chronology

3.2.1 Core MD07-3107 (Reloncaví Fjord, Chile)

Core MD07-3107 is composed of 22 sections presenting multiple centimeter-to-decimeter thick sedimentary cracks due to coring operation issues (**Figure. 3**). These voids were corrected on each set of data to obtain a 28.75-m long continuous sedimentary sequence. On board of the R/V Marion Dufresne II, core MD07-3107 was split, described and digital pictures of each section were taken using a GEOTEK GEOSCAN colour line scan camera. Physical and magnetic properties were acquired using a GEOTEK Multi Sensor Core Logger (MSCL) at 2-cm intervals, as these properties are used to differentiate the background hemipelagic sediments from the rapidly deposited layers (St-Onge et al., 2007). Diffuse spectral reflectance measurements on the sediment was performed with a Minolta CM-2006 spectrophotometer at 2-cm intervals and expressed with the L*, b* and a* parameters of the International Commission on Illumination: L* ranging from black (0) to white (100), b* from blue (-60) to yellow (+60) and a* from green (-60) to red (+60). Geochemical composition of the sediment was acquired at 1-cm intervals using an Avaatech XRF core scanner at the Université de Bordeaux in France. On selected core sections, 3D X-Ray images were acquired at INRS-ETE in Canada using a Siemens Somatom Sensation 64 CT scanner as well as grain size measurements performed at Institut des sciences de la mer (ISMER) in Canada using a Beckman-Coulter LS-13320 Particle Size Analyzer. Grain size measurements were processed with the GRADISTAT software version 4.2 (Blott & Pye., 2001).

A fallout tephra layer was identified in the core between 2792-2797 cm depth. In addition, between 2715-2765 cm depth, multiple layers containing volcanic glass were identified. Bulk sediment samples were collected in these layers at 2755 cm, 2765 cm and 2795 cm depth (**Figure. 3**) and were analysed using three impacts of Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) at IRAMAT in Orléans, France to determine their geochemical composition.

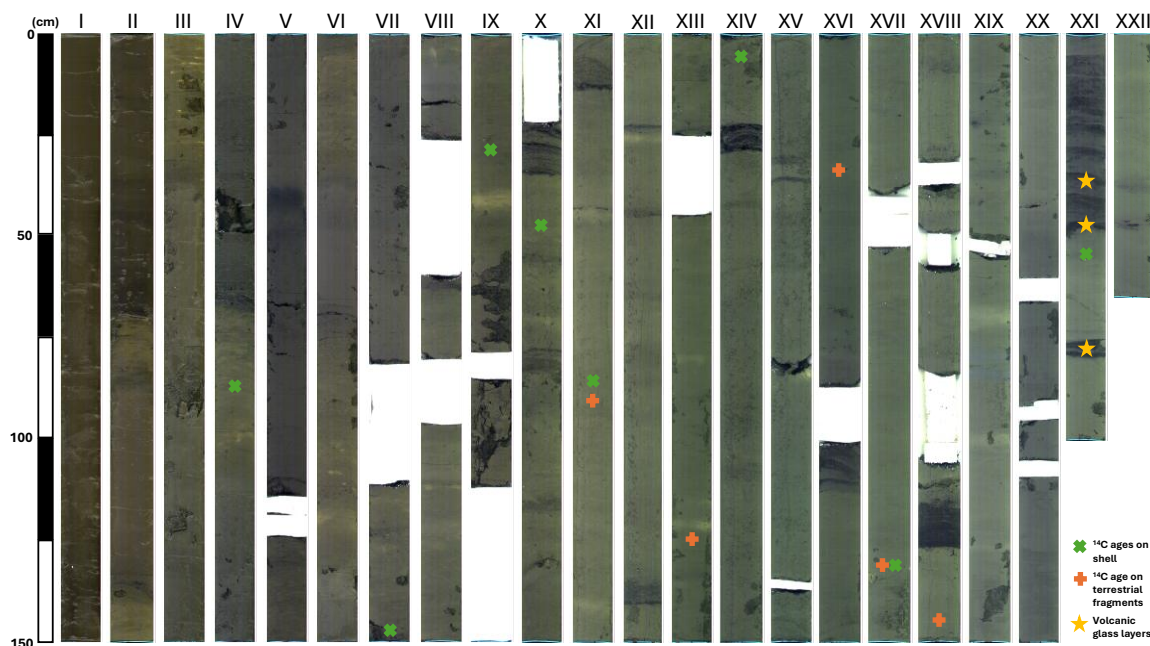


Figure. 3 The 22 sections of core MD07-3107 (colour processed using Fiji image processing package) labelled with roman number (I to XXII). Location of samples for ^{14}C measurements and layers containing volcanic glass are shown (see legend).

For dating, 13 radiocarbon (^{14}C) measurements (**Table 2**) were performed on shell and terrestrial fragments at the Poznań Radiocarbon Laboratory in Poland and the Laboratoire de Mesure du Carbone 14 in France. The age model of core MD07-3108 based on ^{210}Pb analyses, as well as one radiocarbon age (St-Onge et al., 2012) was used in this study, as the upperpart of core MD07-3107 can be precisely correlated with core MD07-3108 (**Figure. S1**). All ^{14}C ages were calibrated with Calib 8.2 (Stuiver et al., 2020) by using the Marine20 curve (Heaton et al., 2020) for shell fragment samples and the SHCal20 curve (Hogg et al., 2020) for terrestrial fragments. The regional reservoir age correction $\Delta R = -6 \pm 35$ was calculated with the Calib database (Merino-Campo et al., 2019) from 10 nearby sites.

Furthermore, two radiocarbon ages, one derived from a shell debris (5095 ± 30 ^{14}C yr BP) and one from terrestrial fragments (4520 ± 35 ^{14}C yr BP), both recovered at 2310 cm depth, allowed us to calculate an older reservoir age $\Delta R = 73 \pm 35$ (**Table 2**). The reservoir age correction was then changed from -6 ± 35 to 73 ± 35 after 5,000 ^{14}C yr BP as achieved by Montade et al. (2012), for the age-depth model of the long core MD07-3104 recovered in Seno Reloncaví.

3.2.2 Core FR08-3 (Lake Frías, Argentina)

Physical and magnetic properties of core FR08-3, including wet bulk density and low field volumetric magnetic susceptibility (k_{LF}) were acquired every 0.5 cm using a GEOTEK MSCL at the Laboratoire Chrono-Environnement in France. X-Ray images were obtained using a GE Discovery CT750 HD CT scanner at the DOSEO platform (French Atomic Energy and Alternative Energy Commission, CEA Paris-Saclay) in France. Measurements using an Avaatech XRF core scanner at 1-mm intervals were acquired at Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE, Université Paris-Saclay, France). Diffuse spectral reflectance measurements were performed at 0.5-cm intervals using a Minolta CM-2006 spectrophotometer. The coarse base of a turbidite identified between 129 and 137 cm containing volcanic glass was sampled and the major elemental composition of the glass shards was determined using a QUATTRO S (FEG-ESEM) Environmental Scanning Electron Microscope coupled with a Dual EDS (60 mm²) and μ -XRF at Laboratoire Géoscience Paris Saclay in Orsay, France. The grain size of this same layer was analysed using a Malvern-Panalytical Mastersizer 3000 laser particle size analyzer at LSCE. The grain size data were processed with the GRADISTAT software version 4.2 (Blott & Pye., 2001).

For dating, radionuclide ^{137}Cs activity (Bq kg^{-1}) was determined by gamma spectrometry using coaxial HPGe detectors at LSCE. Activities of ^{137}Cs were measured over a 24-hour period in subsamples (~ 10 g) sealed in plastic containers. In addition, ^{14}C measurements were carried out on two samples of plant macroremains at the Poznań Radiocarbon Laboratory in Poland (**Table 2**). Finally, based on the interpretations of Ariztegui et al. (2007), that demonstrated with core LF-94-P2 (**Figure. 2C**) that the varved sedimentary infill of Lake Frías recorded the ENSO fluctuations during the Little Ice Age,

we also interpret the lamination in core FR08-3 as varves. Varve counting was performed visually by one observer on the fresh core after splitting and on digital pictures to corroborate the chronology derived from the ^{137}Cs and ^{14}C measurements.

3.2.3 Core Masc-90424 (Lake Masecardi, Argentina)

X-Radiography of the whole core Masc-90424 was performed with a GEOTEK X-Ray Computed Tomography (X-CT) system at ISMER in Canada. Measurements of wet bulk density has been performed on the whole core at 0.5-cm intervals using a GEOTEK MSCL. The core was then split in two halves, described and photographed with a GEOTEK Geoscan IV imaging system. Measurements were also performed on the archived halves at 0.5-cm intervals to obtain the kLF using a Bartington MS2E point sensor, spectral reflectance using a Minolta CM-2600d spectrophotometer (400-700 nm) and geochemical composition using an Olympus Innov-X Delta portable X-Ray fluorescence (pXRF) analyzer online in the MSCL. X-Ray tomography of the split core was performed at the INRS-ETE (Canada) using a Siemens Somatom Definition AS CT scanner. In addition, sediment samples were taken every centimeter of the core and subjected to a pre-treatment to remove organic matter and carbonates (Belzile & Montero-Serrano, 2022), before being analysed using a Malvern-Panalytical Mastersizer 3000 laser particle size analyzer at ISMER. The grain size data were processed with the GRADISTAT software version 4.2 (Blott & Pye., 2001).

For dating, graphitisation of samples of plant macroremains was done at the Centre d'études Nordiques at Laval University (Canada), while AMS ^{14}C measurements were performed at the Keck Carbon Cycle AMS Facility at University of California Irvine (USA) (**Table 3**). The modern post-bomb ages were calibrated using the CALIBomb dataset (Reimer & Reimer, 2025) using the fraction modern $F^{14}\text{C}$ values. In addition, the radionuclide ^{137}Cs activity (Bq kg^{-1}) was determined on sediment sample (~15 g) sealed in plastic petri dishes over a 24h period using an ORTEC GMX50-S high purity germanium Gamma Ray Detector at ISMER, Canada.

Table 2 Radiocarbon (^{14}C) analyses calibrated in Calib 8.2 (Stuiver et al., 2020) with Marine20 (Heaton et al., 2020) and SHCal20 (Hogg et al., 2020) curves. Samples in red were not used in the age models due to their proximity to turbidites and the potential remobilisation.

Sample name	Lab. number	Material	Depth (cm)	^{14}C Age (^{14}C yr BP)	Reservoir correction ΔR (^{14}C yr BP)	Calibrated median age (cal BP)	2 sigma age (cal BP)
Core MD07-3108							
MD07-3108-562	Poz-20879	Shell debris	538	810 ± 30	-6 ± 35	280	104-447
MD07-3108-444	Poz-20917	Terrestrial fragment	432	1220 ± 30	-	1088	981-1177
Core MD07-3107							
3107 VII 1048	Poz-25810	Shell debris	998	1730 ± 30	-6 ± 35	1133	972-1277
3107 IX 1224	SacA 16383	Shell debris	1122	2150 ± 30	-6 ± 35	1569	1391-1727
3107 X 1398	SacA 16385	Shell debris	1231	2345 ± 30	-6 ± 35	1799	1622-1976
3107 XI 1589	SacA 16384	Shell debris	1425	2830 ± 30	-6 ± 35	2412	2231-2644
3107 XI 1596	Poz-25747	Terrestrial fragment	1432	2400 ± 35	-	2396	2157-2689
3107 XIII 1926	SacA 16386	Terrestrial fragment	1742	4245 ± 30	-	4736	4585-4852
3107 XIV 1957	SacA 16387	Shell debris	1773	3895 ± 30	-6 ± 35	3701	3506-3885
3107 XVI 2283	SacA 16388	Terrestrial fragment	2088	3975 ± 30	-	4375	4245-4517
3107 XVII 2534	SacA 16389	Shell debris	2310	5095 ± 30	73 ± 35	5152	4930-5328
3107-XVII 2534	Poz-29933	Terrestrial fragment	2310	4520 ± 35	-	5152	4975-5303
3107 XVIII 2696	SacA 16390	Terrestrial fragment	2434	4815 ± 30	-	5522	5332-5591
3107 XIX 2727,9	SacA 16391	Shell debris	2460	5010 ± 30	73 ± 35	5047	4853-5254
3107 XXI 3056	Poz-25811	Shell debris	2769	7080 ± 50	73 ± 35	7321	7150-7485
Core FR08-3							
FR3B 64	Poz-27044	Plant macroremains	129	265 ± 30	-	280	145-220 (48.1%) 264-323 (45.3%) 412-433 (2.1%)
FR3B 96	Poz-27045	Plant macroremains	153	185 ± 30	-	154	0-30 (11.4%) 56-158 (35.6%) 165-282 (48.4%)

Table 3 Radiocarbon (^{14}C) ages calibrated using the South Hemisphere Zone 1-2 (SHZ1_2) post-bomb calibration curve in CALIBomb (Reimer & Reimer., 2025) using the fraction modern values $F^{14}\text{C}$.

Sample name	Laboratory Number	Material	Depth (cm)	Age ^{14}C (yr BP)	$F^{14}\text{C} \pm \text{error}$	$\text{D}^{14}\text{C} \pm \text{error} (\text{‰})$	Calibrated median age (cal AD)	2 sigma age (cal AD)
<i>Core Masc-90424</i>								
Masc-90424-OM-4cm	ULA-12582	Plant macroremains	4	Modern	$1,0561 \pm 0,0017$	56.1 ± 1.7	2009	2008-2011
Masc-90424-OM-15cm	ULA-12581	Plant macroremains	15	Modern	$1,1358 \pm 0,0018$	135.8 ± 1.8	1993	1959-1994
Masc-90424-OM-32cm	ULA-12580	Plant macroremains	32	Modern	$1,4132 \pm 0,0022$	413.2 ± 2.2	1974	1963-1974

4. RESULTS

4.1 Reloncaví Fjord

4.1.1 Sedimentary fascies

Core MD07-3107 is composed of multiple RDL intercalated with hemipelagic sediments (**Figure. 4**). The hemipelagic sediment are composed of bioturbated yellowish silty clay and present a density of $\sim 1.4\text{-}1.5 \text{ g cm}^{-3}$ and a magnetic susceptibility (MS) of $\sim 100\text{-}150 \cdot 10^{-5} \text{ SI}$. They are also characterized by higher values of b^* due to their yellowish color. The physical, magnetic and sedimentological properties of the RDL contrast sharply with the hemipelagic sediment. The RDL also appear differently on the digital photographs and the X-CT images available. The 31 RDLs identified in the sediment core are divided into five different sedimentary facies (**Figure. 5 ; Table 4**) : megaturbidites (T), sandy turbidites (tn), contourites (c), a tsunami deposit (tsu) and a tephra (tp).

Megaturbidites – Eight megaturbidites of thickness varying between 35 and 218 cm can be observed. These megaturbidites are identified on the seismic profile as stacked acoustic-transparent facies in the channel-levee system present in front of a drift deposit (**Figure. 2B**). These thick deposits present a sharp sandy base characterized by a density reaching 2 g cm^{-3} and a MS reaching $700 \cdot 10^{-5} \text{ SI}$. These two proxies show maximum values at the base of the megaturbidites and decrease toward the top, indicating normal grading, typical of turbidite sequence (Bouma, 1962). Furthermore, the turbidites are overlain by a homogeneous muddy facies that may correspond to a homogenite (Chapron et al., 1999; Seibert et al., 2024). These deposits contain higher amount of heavy minerals (high a^* values) and less organic matter (low b^* values). The coarse base of some megaturbidites show different pulses (i.e., T3 and T8), which still correspond to a single event deposit, as there is no hemipelagic sediments intercalated between, as per the definition of amalgamated turbidites of Van Daele et al. (2017).

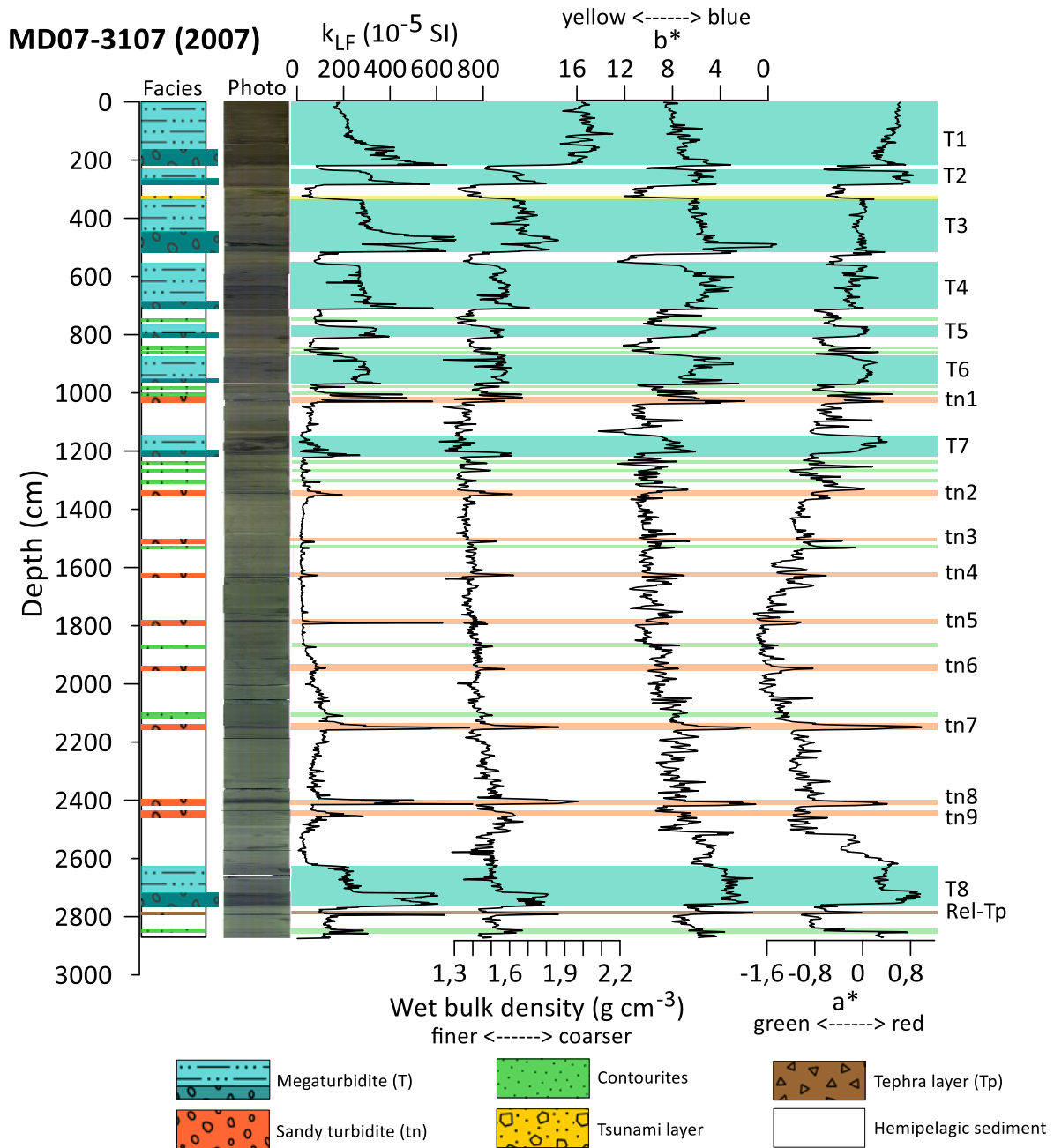


Figure. 4 Physical, magnetic, geochemical and sedimentological properties of core MD07-3107 and identification of 31 RDLs from six sedimentary facies including the hemipelagic sediment. Wet bulk density, a^* and b^* curves are smoothed using a 2-points moving average.

Sandy turbidites – A total of nine sandy turbidites were identified in the core with thickness varying between 5 and 19 cm. These sandy turbidites show a coarse, sharp and dark (on the

digital photographs) base with density values ranging between 1.5 to 2 g cm⁻³ and MS values reaching up to 800.10⁻⁵ SI for tn7 and tn8 (**Figure. 4**). They present a normal grading trend but are not overlain by homogenites like the megaturbidites (**Figure. 5**).

Contourites – Thin (2-9 cm) sandy layers with no fining upward trend, unlike both types of turbidites previously described, were identified in core MD07-3107. The density and MS values are slightly higher than the background hemipelagic sediment values and they show distinctive light layers (denser material) on the X-CT images, which distinguished them from the hemipelagic sediment (**Figure. 5**). We associate the origin of these layers with the drift deposit shaped by the contour currents created in the embayment of Seno Reloncaví and present at the entrance of the outer basin of the fjord where core MD07-3107 was collected (Chapron et al., 2006 ; Valle-Levinson et al., 2007 ; St-Onge et al., 2012 ; **Figure. 2B**). As it is not easy to differentiate small turbidity currents deposits from contour currents deposits (Faugères & Stow, 1993; Mulder et al., 2008), we suggest some hypotheses about the origin of these thin deposits: their formation could be attributed to contour currents, small turbidity currents, or both, where small turbidites are reworked by contour currents. We refer to them as contourites in this study.

Tsunami layer – The tsunami layer identified between 332-338 cm in core MD07-3108 immediately above the third megaturbidite (T3), associated with the AD 1575 earthquake and its tsunami, is also present in core MD07-3107. This tsunami layer is a sandy layer composed of coastal materials, such as sea urchin's fragments and exhibits peculiar microtextures that are characteristic of environments with high energy level (see St-Onge et al., 2012 for details).

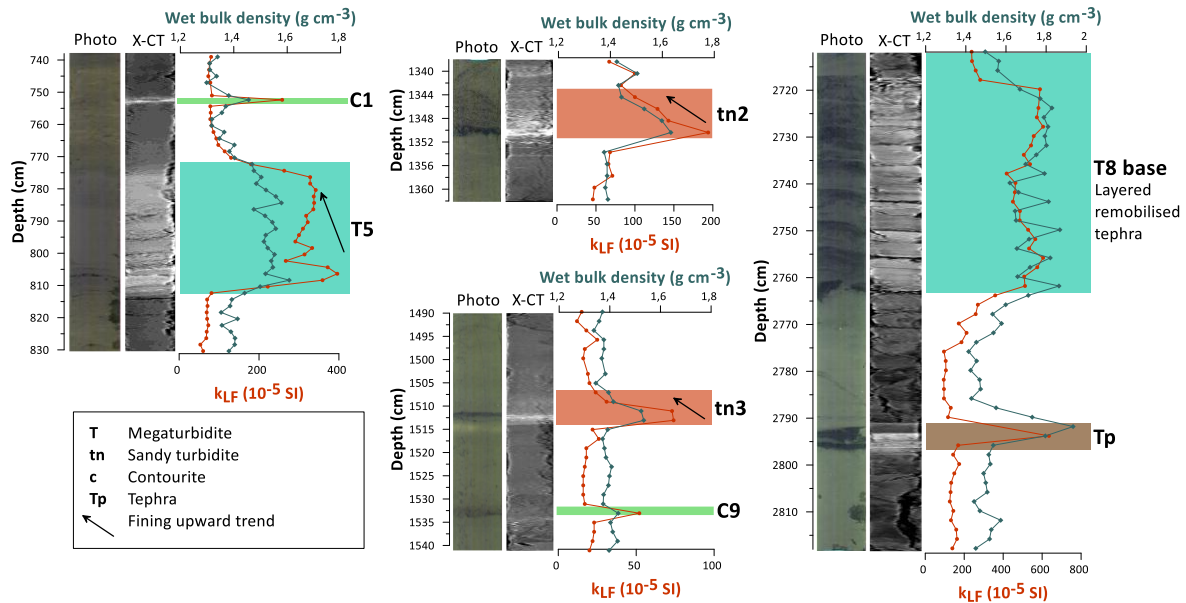


Figure. 5 Examples of each sedimentary facies identified in core MD07-3107 (except the tsunami layer).

Tephra – 5-cm thick tephra layer (Rel-Tp) was identified in core MD07-3107 between 2792 and 2797 cm depth (**Figure. 5**). The composition in major elements of this fallout tephra depicts a basaltic-andesitic magma according to the Total Alkali Silica (TAS) diagram classification (LeBas et al., 1986) (**Figure. 6**). In addition, bivariate plots (**Figure. 6**) help to associate the geochemical composition of the tephra with the magmatic signature of the nearby Calbuco volcano (**Figure. 1B**). The geochemical composition of the reworked tephra layers sampled at 2715 and 2765 cm depth, at the base of the subsequent megaturbidite T8 (**Figure. 5**), reveals the same magmatic signature and therefore, is also associated with the activity of the Calbuco volcano.

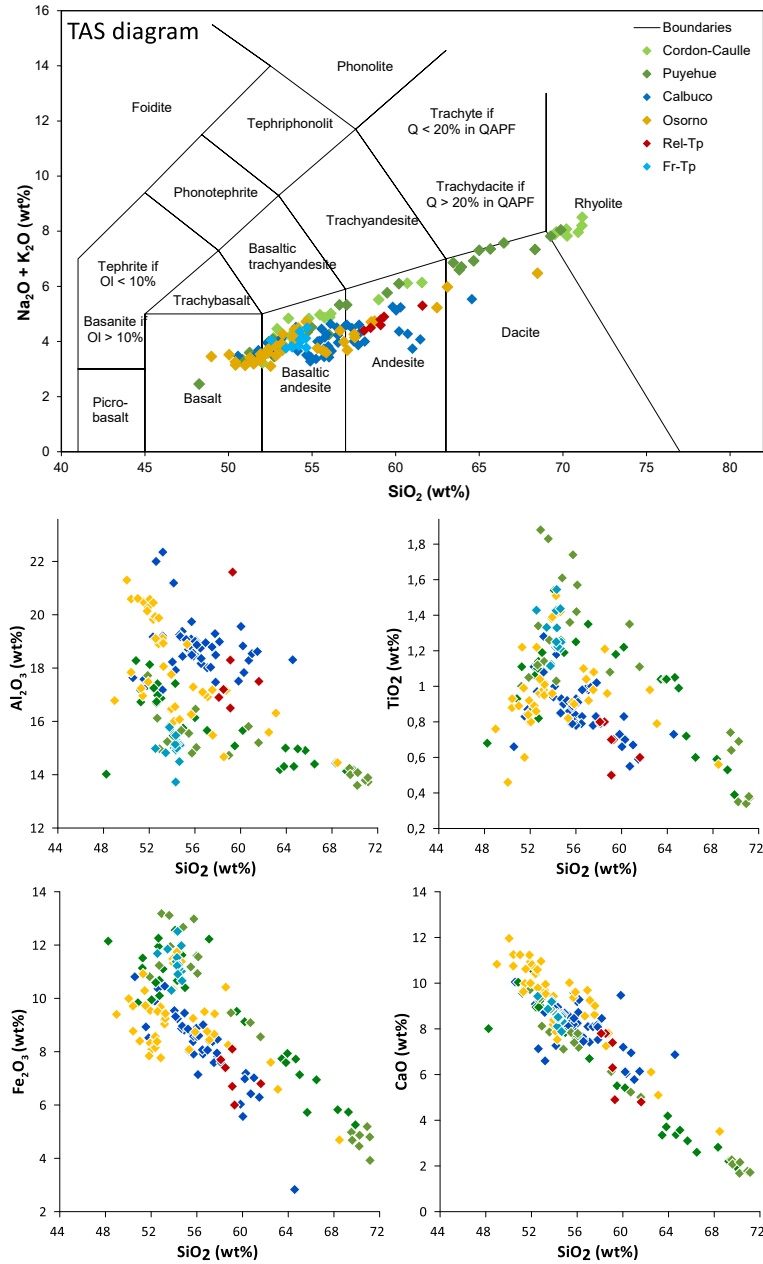


Figure. 6 The geochemical composition of the fallout tephra (Rel-Tp) from core MD07-3107 and the remobilised tephra layer from core FR08-3 (Fr-Tp), compared with the geochemical composition of the nearby volcanoes of the area : Calbuco (López-Escobar et al., 1995; Sellés & Moreno, 2011), Osorno (López-Escobar et al., 1992 ; Moreno et al., 2010), and Puyehue-Cordon Caulle (Singer et al., 2008) on the Total Alkali Silica (TAS) diagram (LeBas et al., 1986) and bivariate plots. The geochemical composition of Rel-Tp and Fr-Tp are given in **Table S1** and **Table S2**.

Table 4 Sedimentary facies identified in core MD07-3107. Examples of each facies are illustrated in **Figure. 5**.

Sedimentary facies		Sedimentological description	Physical properties	Trigger mechanism
Hemipelagic sediment		Bioturbated yellowish silty clay.	Low density and MS. High b* and low a*.	Normal background sedimentation
Megaturbidites (T)	n = 8	Thick (35-218 cm) fining upward grey turbidites. Sharp sandy basal contact overlain by a homogenite.	High density and MS. Low b* and high a*. High grain size.	Earthquake
Sandy turbidites (tn)	n = 9	Thin (5-19 cm) fining upward sandy turbidites. Sharp sandy basal contact.	Moderate to high density and MS.	Earthquake
Contourites (c)	n = 12	Thin (2-9 cm) sandy layer. Dark color on digital picture.	Sharp spike of low to moderate density and MS. White sharp band on the X-CT images.	Contour current, small turbidity current or a mixture
Tsunami layer (tsu)	n = 1	Sandy layer containing sea urchin fragments and grains with fractures, percussions marks, sharp edges.	High mean grain size	AD 1575 Tsunami (St-Onge et al., 2012)
Tephra (Tp)	n = 1	Dark sandy layer containing volcanic glass and quartz.	High density and MS. Low b* and high a*.	Volcanic eruption

4.1.2 Age model

The age model of core MD07-3107 is based on ^{14}C ages (**Table 2**) and the chronology of the top of core MD07-3108 based on ^{210}Pb analyses (St-Onge et al., 2012). As cores MD07-3107 and MD07-3108 can be precisely correlated (**Figure. S1**), we are following the interpretations previously established by St-Onge et al. (2012) for the age of the three uppermost turbidites: T1 (AD 1960), T2 (AD 1837) and T3 (AD 1575). The age model spans the last ~8,700 cal BP (**Figure. 7**). The ages and characteristics of each RDL are listed in **Table 5**.

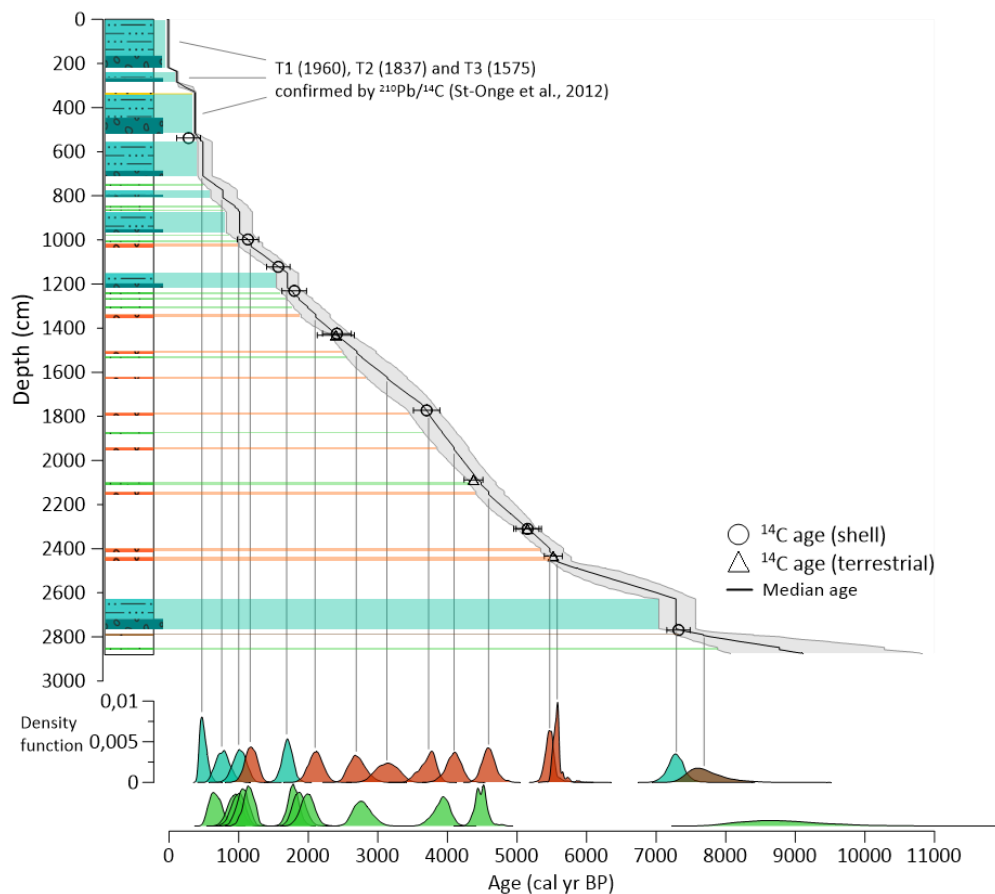


Figure. 7 Age-depth model of core MD07-3107 based on radiocarbon dating made with the R software Bacon package using Bayesian statistics. Black line illustrates the median age, and the grey area illustrates the 95% confidence interval. The probabilistic age distribution of each RDL is illustrated.

Table 5 Characteristics of the 31 rapidly deposited layers (RDL) identified in core MD07-3107.

RDL	Thickness (cm)	Facies	Median age (cal BP)	Min - Max (cal BP)	Median age (cal AD)
T1	218	Megaturbidite	-10	(-25) - 4	1960
T2	48	Megaturbidite	113	99 - 128	1837
tsu	2	Tsunamite	374	358 - 388	1576
T3	181	Megaturbidite	486	413 - 618	1464
T4	155	Megaturbidite	664	514 - 879	
C1	2	Contourites	773	598 - 978	1177
T5	35	Megaturbidite	945	749 - 1133	
C2	5	Contourites	995	799 - 1172	
C3	5	Contourites	1014	822 – 1196	936
T6	96	Megaturbidite	1060	888 - 1221	
C4	2	Contourites	1147	983 - 1289	
C5	5	Contourites	1179	1005 - 1342	771
tn1	17	Sandy turbidite	1701	1543 - 1858	249
T7	68	Megaturbidite	1786	1625 - 1953	
C6	5	Contourites	1869	1692 - 2061	
C7	7	Contourites	1990	1789 - 2188	
C8	5	Contourites	2108	1897 - 2315	
tn2	13	Sandy turbidite	2700	2499 - 2977	
tn3	9	Sandy turbidite	2772	2553 - 3053	
C9	2	Contourites	3137	2843 - 3421	
tn4	6	Sandy turbidite	3735	3464 - 3911	
tn5	5	Sandy turbidite	3927	3660 - 4129	
C10	3	Contourites	4095	3853 - 4305	
tn6	9	Sandy turbidite	4485	4325 - 4697	
C11	9	Contourites	4593	4410 - 4817	
tn7	13	Sandy turbidite	5471	5341 – 5669	
tn8	15	Sandy turbidite	5571	5481 - 5780	
tn9	19	Sandy turbidite	7285	7039 – 7567	
T8	135	Megaturbidite	7678	7332 – 8399	
Rel-Tp	3	Tephra	8771	7884 - 10 281	
C12	10	Contourites			

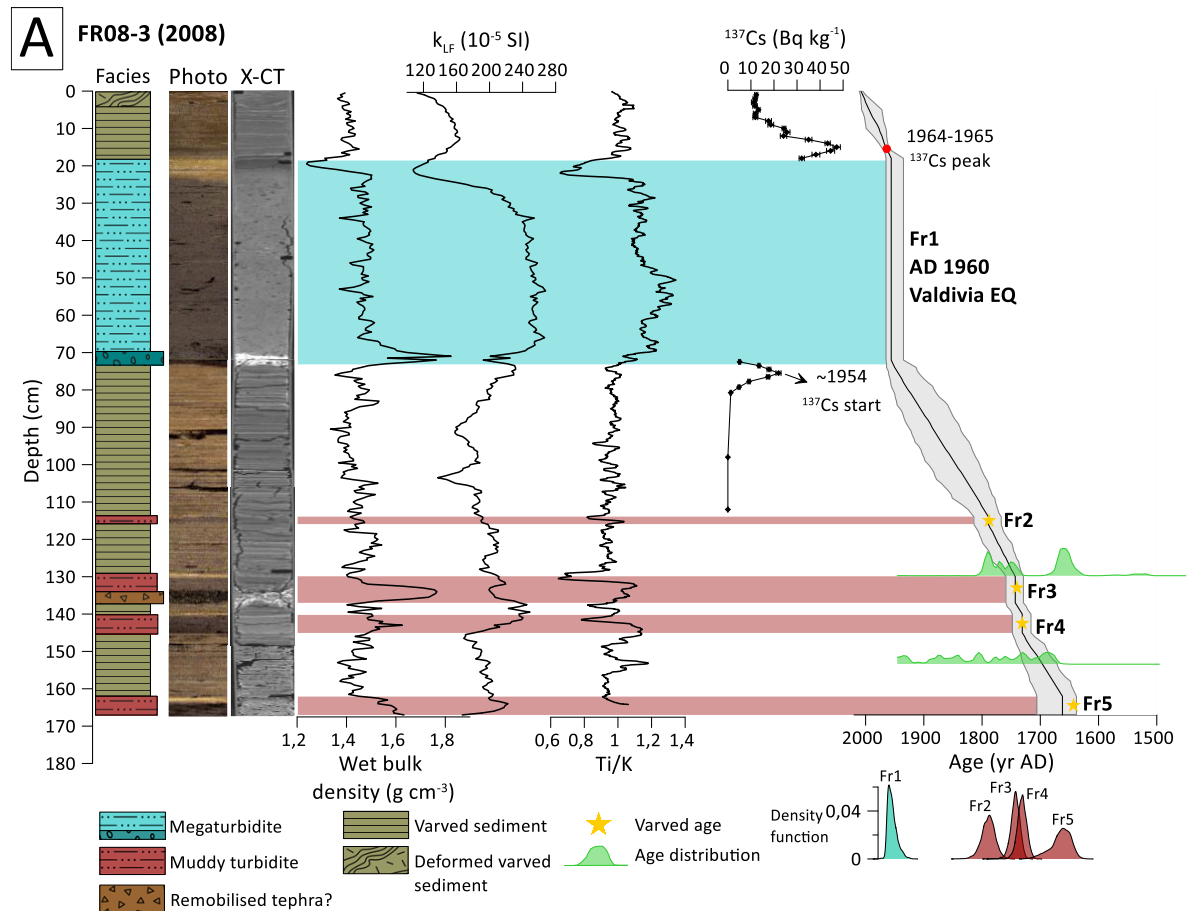
4.2 Lake Frías

Core FR08-3 is composed of brown laminated silt intercalated with five dark grey muddy turbidites (**Figure. 8A**). The 54-cm thick upper turbidite Fr1, identified between 18 to 72 cm depth, consists of a thin coarse base (light layer on the X-CT image) overlain by a thick homogenite (Chapron et al., 1999). The base of the turbidite is characterised by high values of wet bulk density reaching 1.8 g cm⁻³, whereas the homogenite is characterised by high and constant MS values, as well as an increase of the Ti/K ratio, as Ti is a resistant element commonly enriched in turbidites (e.g., Stuut et al., 2007; Rothwell & Croudace, 2015). The turbidite is covered by a 4-cm thick yellowish-brown clay cap characterised by a decrease in all the properties (**Figure. 8A**).

The four others turbidites of variable thickness, labeled Fr2, Fr3, Fr4 and Fr5, consist of a sharp, dark grey, homogeneous, normal-graded bed and are overlain by a yellowish-brown clay cap. Turbidite Fr3 presents an erosive base, which is composed of very coarse sand (< 1500 µm) and contains a mixture of epiclastic and pyroclastic fragments (**Figure. 8B**). The geochemical composition of the pyroclastic grains of this layer is presented in Figure. 6. The geochemical composition of the glass shards shares similarities with that of the nearby Osorno volcano (**Figure. 6**).

For the uppermost part of core FR08-3, the age model is based on ¹³⁷Cs measurements which allow to identify the 1964-1965 fallout peak from the nuclear testing observed in South America (Arnaud et al., 2006; Foucher et al., 2021). The second peak marking the beginning of the nuclear testing in ~1954 identified just under the megaturbidite Fr1 suggest that the base of this RDL is not erosive (**Figure. 8A**). For the lowermost part of the core, below the turbidite Fr1, the age model is supported by two ¹⁴C measurements. The significant variations of the ¹⁴C age distribution (**Figure. 8A**) could potentially be attributed to the remobilisation from the drainage basin of Lake Frías, a possibility previously raised by Ariztegui et al. (2007). The first ¹⁴C age was sampled just above the turbidite Fr3 and could have been remobilised, whereas the second ¹⁴C age collected in the varved section between Fr4 and Fr5

probably provide a more accurate temporal marker. Furthermore, **Figure. 8A** indicates the number of varves counted between each turbidites. The characteristics and age interval of each RDL in core FR08-3 are given in **Table 6**.



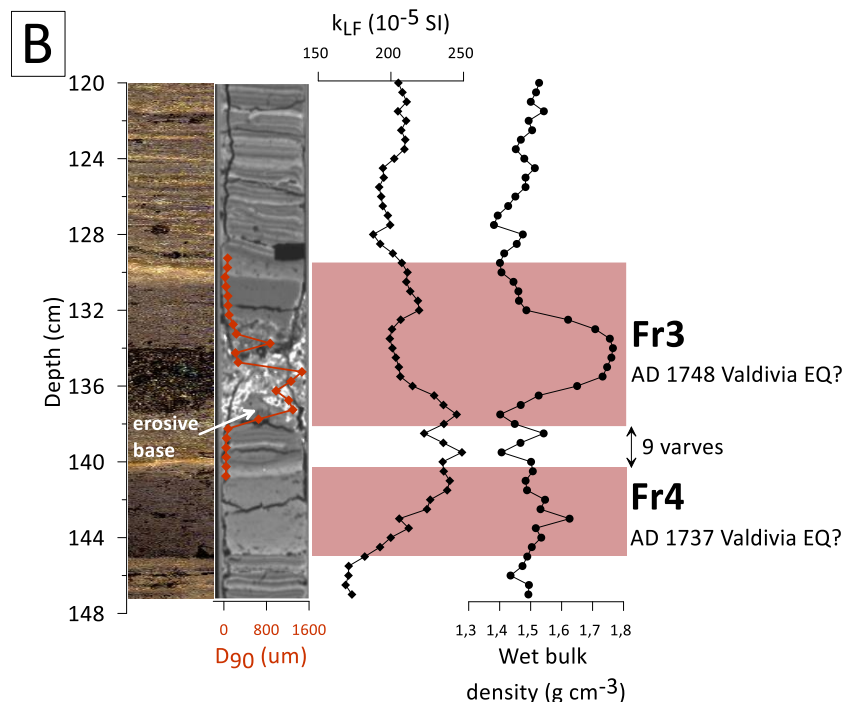


Figure. 8 A) Physical, magnetic, geochemical and sedimentological properties of core FR08-3 from Lake Frías and its age model based on ^{137}Cs activity, ^{14}C measurements and varve counting made with the R software Bacon package. The detection of ^{137}Cs activity shows the start of the atmospheric concentration in AD ~1954 and their maximum in AD 1964-1965 (Foucher et al., 2021). The ages obtain from varve counting between each turbidites are indicated by yellow stars. B) Zoom on turbidites Fr3 and Fr4 illustrating the coarse base of turbidite Fr3 containing a mixture of epiclastic and volcanic fragments.

4.3 Lake Mascardi

Core Masc-90424 is composed of dark brown laminated fine silt intercalated with 1-cm thick dark sandy silt layers, labeled Ms1, Ms2, Ms3 and Ms4, located respectively at 5.5, 16, 27 and 38 cm depth (**Figure. 9**). These layers are characterised by high CT number values (reflecting the sediment density), high MS values and high grain size (sand fraction and D_{90}). Particularly, the layer Ms1 at the top of the core is characterised by peaks of CT number and MS values that contrast sharply with the laminated hemipelagic sediment. These sandy layers, observed under a binocular microscope, are composed primarily of epiclastic fragments, with mixed populations of pyroclastic fragments. In addition, a thick deformed

layer composed of sand ($D_{90} < 382 \mu\text{m}$) in a muddy matrix is observed at the base of the core between 42 and 51 cm depth (**Figure. 9**). This layer is characterized by high CT number values, very high MS values ($< 1,200.10^{-5} \text{ SI}$) and low L^* values indicating a darker color.

The age model of core Masc-90424 is based on the ^{137}Cs activity and three ^{14}C ages (**Table 3**). The ^{137}Cs peak reflecting the 1964-1965 fallout from the nuclear testing was identified at 40 cm, just above Ms5 (**Figure. 9**). The ^{14}C modern ages are consistent with this temporal marker. The characteristics and age interval of each RDL in core Masc-90424 are given in **Table 6**.

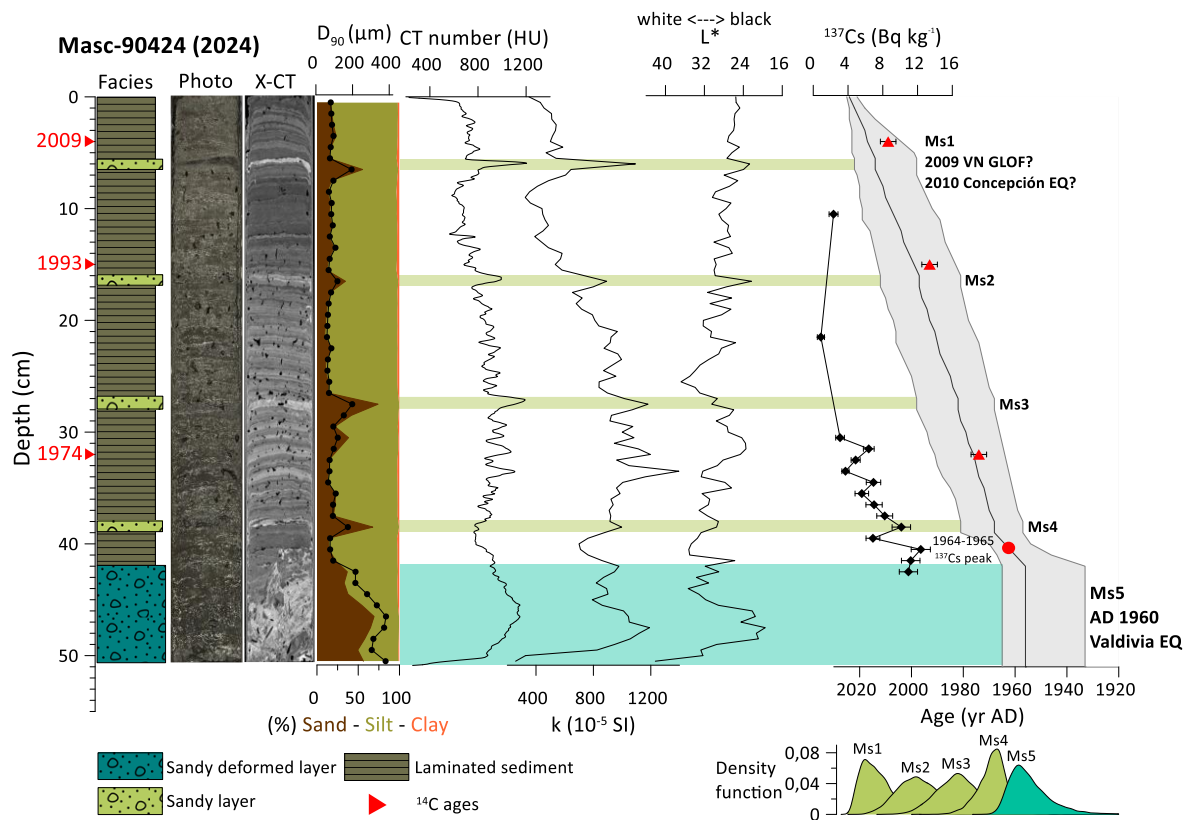


Figure. 9 Physical, magnetic, geochemical and sedimentological properties of core Masc-90424 from Lake Mascardi and its age model based on ^{137}Cs activity and ^{14}C ages made with R software Bacon package. VN GLOF: Ventisquero Negro Glacial Lake Outburst Flood.

Table 6 Characteristics of the rapidly deposited layers (RDL) identified in core FR08-3 and Masc-90424.

RDL	Thickness (cm)	Facies	Median age (cal AD)	(Min - Max) (cal AD)
<i>Core FR08-3</i>				
Fr1	54	Turbidite	1956	1935-1965
Fr2	2	Muddy turbidite	1789	1767-1814
Fr3	7	Muddy turbidite	1743	1729-1759
Fr4	5	Muddy turbidite	1731	1716-1748
Fr5	5	Muddy turbidite	1662	1638-1706
<i>Core Masc-90424</i>				
Ms1	1	Sandy layer	2014	1998-2022
Ms2	1	Sandy layer	1997	1981-2012
Ms3	1	Sandy layer	1982	1968-1998
Ms4	1	Sandy layer	1968	1957-1981
Ms5	9	Debris flow	1956	1933-1965

5. DISCUSSION

5.1 The recent events record of Lake Mascardi

The event record captured in core Masc-90424 starts with Ms5, a 10-cm thick deformed muddy sand layer dated cal AD ~1956 (**Figure. 9**). Core Masc-90424 was collected less than 1 km in front of the Manso delta in Lake Mascardi, which is fed by a regular supply of sediment from the upper Manso River originating from the Cerro Tronador (**Figure. 1C**). Given the proximal location of the coring site to the delta, it is possible to assume that this deposit was triggered by a debris flow generated during the AD 1960 Valdivia earthquake. This type of deposit has been identified in cores taken from similar settings, in proximal deltaic part of lakes, following the AD 1960 earthquake (Van Daele et al., 2015). Therefore, we associate this thick RDL to the AD 1960 Valdivia earthquake, revealing the first occurrence of a sedimentary trace of this event in Lake Mascardi (**Figure. 10; Table 7**).

The following thin sandy layers Ms1 to Ms4 are more likely to have been triggered by local floods in the Manso arm of Lake Mascardi than by a regional earthquake. The uppermost sandy layer Ms1 dated cal AD ~2014 (**Table 6**) may have been triggered by the 2009 Ventisquero Negro GLOF. During this catastrophic event, the frontal moraine of the proglacial lake Ventisquero Negro collapsed, following days of heavy precipitations, which resulted in the release of 10×10^6 m³ of water, lowering the lake water level by 27 m and resulting in the rapid flooding of the entire Manso valley (Worni et al., 2012). Sabatier et al. (2022) divided GLOF-triggered deposits in two types: 1) Sandy turbidites in lakes located directly downstream the source lake or connected to it by a short proglacial river; and 2) Muddy layers in lakes that are not located directly downstream from the source lake due to the presence of an intermediate lake or that are separated to the source lake by a long proglacial river. The Manso arm of Lake Mascardi, where core Masc-90424 was collected, lies between these two cases, as it is connected by a long proglacial river (~20 km), but directly downstream with no intermediate lake basin, to the Ventisquero Negro source lake (**Figure. 1C**). Although, given the strength of the 2009 Ventisquero Negro GLOF where heavy discharges of debris flow, reaching $4100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, were registered (Worni et al., 2012), chances are that the sandy layer Ms1, dated cal AD ~2014 and contrasting sharply with the laminated background sedimentation, was triggered by this event. This deposit is also synchronous with the M_w 8.8 2010 Concepcion earthquake along the Maule segment; however, a trigger by this event remains highly speculative, as Lake Mascardi is located far south (~500 km) from the approximate rupture zone of this earthquake (**Figure. 1A**) and thus, subjected to a low (~V) shaking intensity (USGS, 2014).

The other thin sandy layers, Ms2, Ms3 and Ms4, are probably the result of higher precipitations or local floods caused by particularly large spring freshets. Indeed, precipitation recorded at Lake Mascardi meteorological station for the wettest months in 1997 and 1985 were particularly large, reaching almost 400 mm (Worni et al., 2012), compared to an average of ~300 mm for the wettest month between 1970 and 2010 (Pasquini et al., 2013). This could therefore explain the coarser and thicker nature of the layers Ms2 and Ms3 dated cal AD ~1998 and cal AD ~1982, respectively. They could be interpreted as

proximal seasonal flood deposits (Mulder & Chapron, 2011). Furthermore, this would be consistent with the known sensitivity of this lake to glacial meltwater activity by the Cerro Tronador (Villalba et al., 1990; Ariztegui et al., 1997; 2008).

5.2 The regional historical earthquakes in the proglacial Lake Frías

In Lake Frías, the record of core FR08-3 goes back to the early AD 1600s and can thus encompass the historical regional paleoseismicity. The most recent 54-cm thick megaturbidite Fr1, is dated cal AD ~1956 based on our age-depth model (**Figure. 8A**). The sedimentological characteristics of this megaturbidite, composed of a coarse base, a homogeneous muddy facies and a pale clay cap, are similar to those of other megaturbidites triggered by the AD 1960 earthquake in nearby Chilean lakes: Neltume, Panguipulli and Pellaifa (Van Daele et al., 2015). The latter linked the formation of this type of deposits to lake tsunami and a subsequent seiche effect. The lack of historical reports following the AD 1960 earthquake at Lake Frías means that the occurrence of these two phenomena remains hypothetical (Chapron et al., 2006). However, the strong tsunami waves and subsequent landslides induced by the AD 1960 earthquake observed by Villarosa et al. (2009) in the nearby Lake Nahuel Huapi, suggest that similar processes may have occurred in Lake Frías. Therefore, we associate the megaturbidite Fr1 with high confidence to the AD 1960 Valdivia earthquake (**Figure. 10; Table 7**). Furthermore, this megaturbidite provides an additional sedimentary archive of the AD 1960 earthquake in Lake Frías, compared with the 4-cm thick organic-rich layer, previously identified in core LF-94-P2 (Chapron et al., 2006). As core FR08-3 was collected in a more distal context to the delta, and thus further from the Frías River discharge from the Cerro Tronador, than core LF-94-P2 (**Figure. 2C**), a thicker deposit following the AD 1960 earthquake may have been able to be preserved.

As stated previously, the chronology of the lowermost part of core FR08-3 is supported by two ^{14}C ages and a preliminary age control by varve counting (**Figure. 8A**). For the turbidites Fr2 to Fr5, we obtain median ages of cal AD 1789, 1743, 1731 and 1662, respectively (**Table 6**). Considering their age intervals and the location of Lake Frías along

the Valdivia tectonic segment, these turbidites may be synchronous to historical Valdivia earthquakes. The age interval of Fr2, cal AD 1789 (1767-1814), is very close with the AD 1837 earthquake. Based on the historical record and paleoseismological studies, this earthquake would have caused a partial rupture of the southernmost part of the Valdivia tectonic segment, and its northernmost limit is still uncertain. The only trace of this event in the northern part of the segment is a small turbidite identified in a sediment core from Lake Riñihue (39.8°S) (Moernaut et al., 2014; **Figure. 10**). It is thus possible that this earthquake also triggered a small deposit (Fr2) in Lake Frías (41°S). Furthermore, the time intervals of both turbidites Fr3 dated cal AD 1743 (1729-1759) and Fr4 dated cal AD 1731 (1716-1748) overlap with the AD 1737 earthquake, as well as the poorly documented seismic shocks of AD 1741, 1742 and 1748, all briefly mentioned by historical reports (Lomnitz, 2004). Turbidite Fr4 is a muddy turbidite characterised by a sharp contact with the underlying hemipelagic sediment, a homogeneous facies and a pale clay cap, classical of lacustrine turbidites identified in nearby lakes (Van Daele et al., 2015). Turbidite Fr3 also presents these characteristics, but is composed of an erosive base, containing very coarse epiclastic and pyroclastic material (**Figure. 8B**). The presence of such volcanic layer is not surprising, as the Blest embranchment of Lake Nahuel Huapi, located close to Lake Frías and fed by the Frías River originating from the Cerro Tronador, also preserved volcanic ashfall from Chilean volcano eruptions (Serra et al., 2016). A total of nine varves separate Fr3 and Fr4. It is thus possible that the AD 1737 event and the following small earthquake in AD 1748 triggered Fr4 and Fr3 respectively. Sedimentary trace of the AD 1737 earthquake in Lake Frías might help to precise the southernmost limit of this event, as only northern sites (i.e., Riñihue and Chaihuín) recorded evidence of this event. Finally, as turbidite Fr3 is possibly erosive, it is possible that these turbidites are older and additional sediment cores in Lake Frías are needed to validate these preliminary interpretations.

5.3 The Holocene Reloncaví Fjord record and the regional paleoseismicity

The long sediment core MD07-3107 enables the paleoseismic record in the Reloncaví Fjord to be extended to almost 9,000 cal BP, while the previous record was encompassing

the past 600 years (St-Onge et al., 2012). In order to provide an additional paleoseismic record along the Valdivia tectonic segment, we compare the age intervals of the megaturbidites and sandy turbidites identified in the Reloncavi Fjord with those of sedimentary deposits from other paleoseismic records along the Valdivia tectonic segment (**Figure. 10**). We also integrate the two short records from Lake Frías and Lake Mascardi (this study).

Figure. 10 illustrates that most of the megaturbidites and sandy turbidites in the Reloncavi Fjord are synchronous with previously established ruptures along the tectonic segment (Wils et al., 2020). The historical and paleoearthquakes recorded in the Reloncavi Fjord are listed in **Table 7**. The first three megaturbidites in our record can be associated with the large historical Valdivia earthquakes of 1960 (T1), 1837 (T2) and 1575 (T3), as established by St-Onge et al. (2012) for core MD07-3108. Based on its similar sedimentological characteristics with T1 and T3, both of which associated with full-rupture earthquakes, we suggest that the megaturbidite T4, dated cal AD 1464 (1332–1537), could have been triggered by another full-rupture event. Hence, even if the age of T4 stretches more towards the small event recorded in Lake Riñihue in AD ~1465, which would have caused a rather limited rupture along the Valdivia tectonic segment (Moernaut et al., 2014; 2018), we suggest this megaturbidite to have been triggered by the full rupture event AD ~1319 (**Figure. 10**), a hypothesis already put forward by St-Onge et al. (2012). Megaturbidite T5 is also synchronous with multiple deposits in the northern and southern part of the segment and can thus be attributed to the full rupture of AD ~1127 (Moernaut et al., 2018; Wils et al., 2020). The following megaturbidite T6 dated AD ~936 lies within the gap evoked by Wils et al. (2020), who suggested a period of seismic quiescence between AD ~745 and ~1127. The only other deposit that is synchronous with T6 is a deposit from Lake Cucao, labelled cC, associated with high confidence to a tsunami by Kempf et al. (2020). These deposits may be related to a local earthquake that triggered a tsunami in Lake Cucao on Chiloé Island and shaking in the Reloncavi Fjord vicinity. The following megaturbidite tn1 and T7 are synchronous with the full ruptures in AD ~745 and ~300 (**Figure. 10**).

The age intervals of the older turbidites (tn2 to tn8 and T8) also overlap with those of older deposits associated with full ruptures of the segment (Wils et al., 2020). Only, the sandy turbidite tn9 is left uncorrelated and is thus expressed in grey on **Figure. 10**. The absence of older data in the northern part of the segment could explain this, as the only comparable record is located in the southern part of the segment, in Aysén Fjord. Therefore, a partial rupture in the northern part of the segment as the origin of this deposit cannot be confirmed, neither ruled out, based on the available records. Finally, during the early-mid Holocene, the megaturbidite T8 dated 7285 (7039-7567) cal BP is synchronous with the deposit SL-DE 7460-7540 cal BP in Aysén Fjord, which is thought to have been triggered by a megathrust earthquake (Vanneste et al., 2018; Wils et al., 2018). However, the correlation of these older turbidites is more difficult to be established, as age uncertainties increase with the age of the records. These correlations should be evaluated with caution and as pointed out by Wils et al. (2020), a standardised database of these records is needed to precisely correlate these events and evaluate the rupture area of megathrust earthquakes along the Valdivia tectonic segment.

As the 17 megaturbidites and sandy turbidites from Reloncaví Fjord are most likely triggered by regional earthquakes along the Valdivia tectonic segment, it is thus possible to suggest a recurrence interval. For the past ~8,700 cal BP, the Reloncaví Fjord encompasses 13 full-rupture events (T1, T3, T4, T5, tn1, T7, tn2, tn3, tn4, tn5, tn6, tn7 and tn8) and 3 partial rupture events (T2, T6, and T8). Only tn9, dated ~5,500 cal BP, is left uncorrelated to other deposits. With 6 full-rupture events during the last two millennia, using the median age of each deposit to calculate the interevent time, we obtain a recurrence of 342 ± 153 years (1σ of the interevent time). This recurrence is broadly consistent with the recurrence of 292 ± 93 years in Lake Riñihue for $M_w > 8.6$ events for the past 3,600 years (Moernaut et al., 2018) and 321 ± 116 years (1σ) in Aysén Fjord for full-rupture events for the past 2,000 years (Wils et al., 2020). Since seismic events were still frequent up to 4,600 cal BP (**Figure. 10**), we calculated a recurrence interval for full-rupture events of 466 ± 208 years (1σ) over the last 4,600 years. However, this recurrence should not be used to assess the seismic risk along the tectonic segment, as it covered a wide time interval and expressed a high temporal

variability (high 1σ), that is not necessarily reflecting of the seismic activity register in the Reloncavi Fjord for the past 2,000 years. Before 4,600 cal BP, only three earthquake-triggered deposits were identified in the Reloncavi Fjord (i.e., tn8, tn9 and T8), separated by two long intervals where no earthquake-triggered deposits were identified: ~4600-5500 cal BP and ~5500-7200 cal BP (Figure. 10). These two intervals, also observed in the Aysén Fjord record, could be related a priori to aseismic periods.

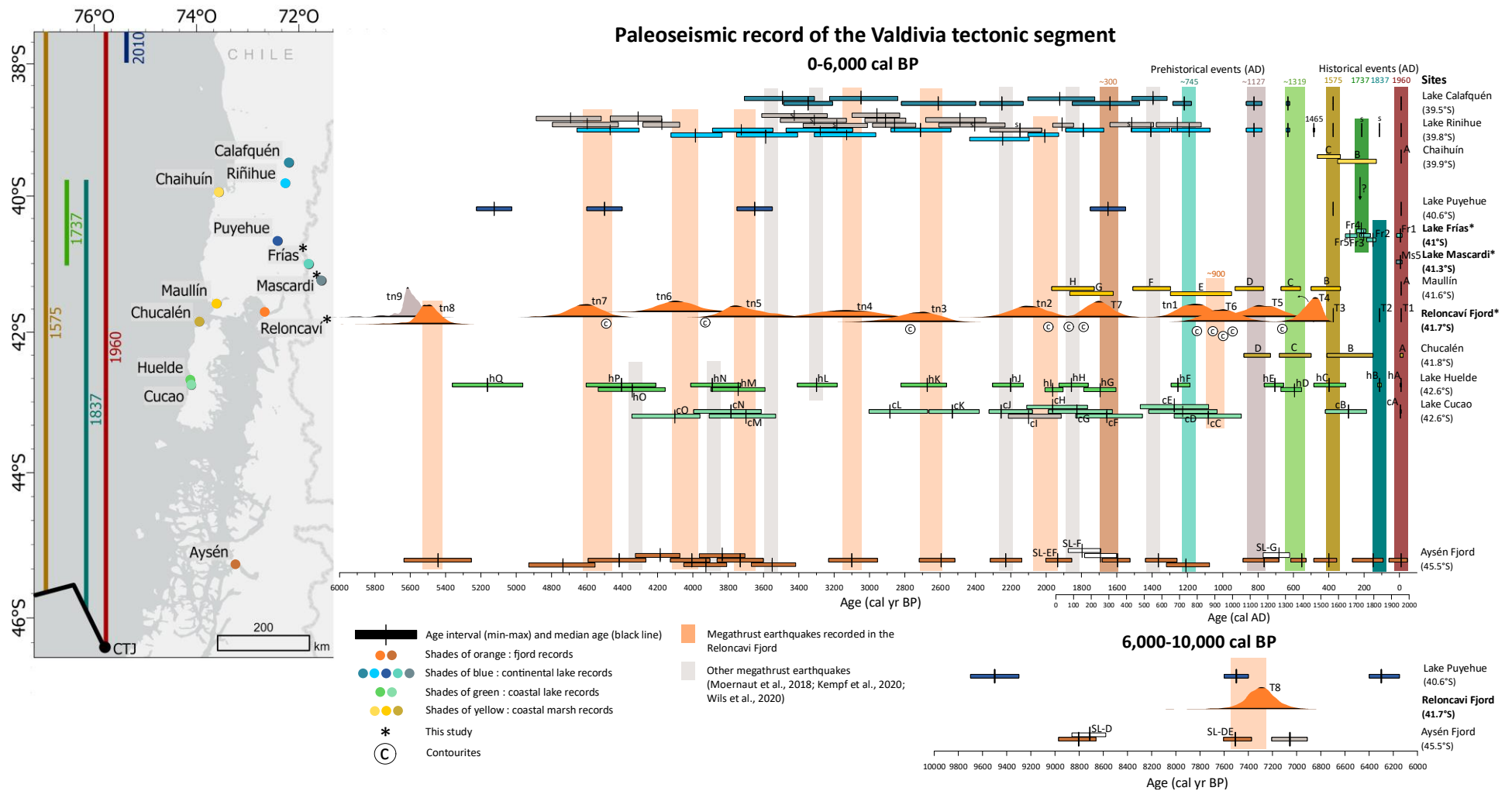


Figure. 10 Paleoseismic records along the Valdivia tectonic segment in south-central Chile showing age intervals of megathrust earthquake deposits at different locations: Lakes Calafquén and Riñihue (Moernaut et al., 2014; 2018), Lake Puyehue (Moernaut et al., 2007), Maullín (Cisternas et al., 2005), Chucalén (Garrett et al., 2015), Chaihuín (Hocking et al., 2021), Lake Huelde (Kempf et al., 2017), Lake Cucao (Kempf et al., 2020) and Aysén Fjord (Wils et al., 2020) in comparison with the records of Reloncaví Fjord, Lake Frías and Lake Mascarcardi (this study). Note that the map and the paleoseismic records are not to scale with each other.

Table 7 Earthquakes identify from RDL in the Reloncaví Fjord (MD07-3107), Lake Frías (FR08-3) and Lake Mascardi (Masc-90424). The X on the table indicate whether the RDL are synchronous with deposits from other paleoseismic sites as shown in **Figure. 10**.

X : deposits synchronous

? : deposits possibly synchronous

- : end of the paleoseismic record

Historical / prehistorical earthquakes		L. Calafquén (39.5°)	L. Riñihue (39.8°)	Chaihiun (tsunami) (39.9°)	L. Puyehue (40.6°)	L. Frías (41°)	L. Mascardi (41.3°)	Maullín (tsunami) (41.6°)	F. Reloncaví (41.7°)	Chucalén (tsunami) (41.8°)	L. Huelde (42.6°)	L. Cucao (42.6°)	F. Aysén (45.5°)
Age (cal AD)	Age (cal BP)												
1960		X	X	X	X	Fr1	Ms5	A	T1	X	X	X	X
1837						Fr2?	-		T2		X	X	X
1748						Fr3?	-						
1737			X	X		Fr4?	-						
1575		X	X	X	X	-	-	B	T3	X	X	X	X
1319 (1300-1400)		X	X	-		-	-	C	T4	X	X		X
1127 (1080-1200)		X	X	-		-	-	D	T5	X	X		X
900 (850-950)				-		-	-		T6	-		X	
745 (720-800)		X	X	-		-	-	E	tn1	-	X	X	X
300 (250-350)		X	X	-	X	-	-	G	T7	-	X	X	X
-50 (0-130)	2000 (1950-2080)	X	X	-		-	-	H?	tn2	-	X	X	X
	2650 (2600-2700)	X	X	-		-	-	-	tn3	-	X	X	X
	3100 (3050-3150)	X	X	-		-	-	-	tn4	-			X
	3700 (3650-3750)	X	X	-	X	-	-	-	tn5	-	X	X	X
	4050 (3980-4120)	-	X	-		-	-	-	tn6	-	?	X	?
	4550 (4460-4620)	-	X	-	X	-	-	-	tn7	-	?	-	X
	5480 (5420-5530)	-	-	-		-	-	-	tn8	-	?	-	X
	5600 (5480-5780)	-	-	-		-	-	-	tn9	-	-	-	
	7400 (7250-7550)	-	-	-	X	-	-	-	T8	-	-	-	X

5.4 Changes in sedimentary dynamic in Reloncaví Fjord and implications

A significant change in the earthquake-triggered turbidites thickness occurred in core MD07-3107 around ~2,000 cal BP. The uppermost turbidites, particularly T1, T3, T4 and T6, are very thick, their thickness ranging from one to more than two metres, whereas all earthquake-triggered turbidites before 2,000 cal BP, besides T8, are much thinner (< 20-cm thick) (**Figure. 11**). The formation of thicker deposits over the past 2,000 years may reflect changes in the sedimentary dynamic of the fjord.

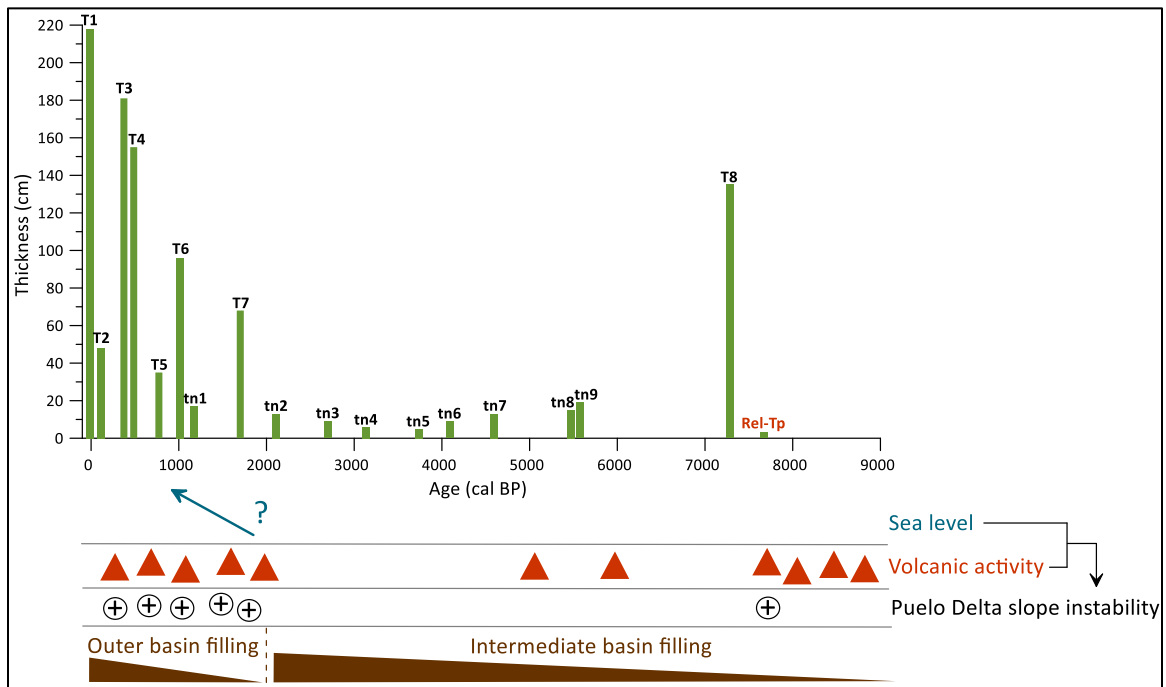


Figure. 11 Schematic interpretations of the different mechanisms contributing to the development of megaturbidite (median age) during the last ~2,000 cal BP. The volcanic activity is based on the volcanic eruptions reconstructed based on tephra horizons from terrestrial outcrops off the Reloncaví Fjord from Watt et al. (2011) as well as the BOOM! database (Martinez Fontaine et al., 2023).

We propose that the formation of megaturbidites in the outer basin could be primarily driven by an interplay of tectonic movements and volcanic activity. Chapron et al. (2006) and St-Onge et al. (2012) previously suggested that the sediment input from the Puelo river

into the intermediate basin of the fjord, was the starting point of the formation of mass-wasting deposits (MWD). As stated previously, the Puelo river drains both Chilean and Argentine lakes (**Figure. 1B**) over a large catchment area ($\sim 9000 \text{ km}^2$) and produces spring discharge of up to $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ into the Reloncavi Fjord through the Puelo delta. These MWD, filling the intermediate basin, would have then promoted the formation of megaturbidites in the outer basin of the fjord (**Figure. 2B**). Hence, we believe factors contributing to the instability along the slope of the Puelo delta, and causing sediment remobilisation, could have enhanced the formation of these megaturbidites.

Evidence of a relative sea level rise was found in the nearby locations of Maullín (Cisternas et al., 2005), Cocotué (Cisternas et al., 2017b) and Chucalén (Garrett et al., 2015), where tsunami deposits from buried soils allow to reconstruct tsunami history over the last $\sim 1,000$ - $2,000$ years. Dura et al. (2016) demonstrate how relative sea level rise helped the preservation of earthquake-triggered deposits along subduction zones, such as the Chilean subduction margin, by providing accommodation space. Furthermore, the recent Chilean Relative Sea Level Database (Garrett et al. 2020), compiling 166 sea-level datapoints from multiple studies among 11 regions along the Chilean coast, modelled a Late Holocene Sea level rise (1-3 ka BP) in localities in close proximity to the fjord, such as the Chacao Channel, Gulf of Ancud and central Isla Chiloé (**Figure. 2A**). Hence, these sea level rise evidence close to the Reloncaví Fjord suggests that a sea level rise might also have affected the fjord area during this time. Consequently, such sea level rise, even little, may have increase the instability along the Puelo delta, favouring sediment remobilisation along its slope. The origin of a sea level rise at these locations is still unknown but could be linked to a coseismic subsidence caused by the reactivation of regional faults along the Nazca plate (**Figure. 1A**), thus altering the geomorphological, hydrogeological and sedimentological setting of this area.

Moreover, the timing of volcanic eruptions could also be related to the formation of megaturbidites after $\sim 2,000$ cal BP in the fjord by increasing the amount of available sediment in the large watershed of the Puelo River. Watt et al., 2011 shown by analysing

tephra horizons along terrestrial outcrops off the Reloncavi Fjord that the nearby volcanoes (i.e., Calbuco, Hornipirén, Apagado and Yate; **Figure. 1B**) were very active during the Holocene. Notably, the volcanic activity of the Calbuco volcano was particularly high between 10,500 cal BP and 7,000 cal BP, as well as during the last two millennia (Watt et al., 2011). The volcanic material produced by these eruptions may have increased the amount of sedimentary material in the Reloncavi Fjord watershed via the Puelo delta, as it is often observed after large volcanic eruptions in this area (Watt et al., 2009b; Bertrand et al., 2014; Romero et al., 2016).

The thickness of megaturbidite T8, the only one after 2,000 cal BP, could be explained by the previous fallout tephra layer Rel-Tp (**Figure. 4**), which was dated to the early-mid Holocene 7678 (7332-8399) cal BP (**Table 5**). We previously linked this tephra with the Calbuco volcano activity (**Figure. 6**), although further analyses are required to assign a specific eruption to this tephra as many eruptions of this volcano were recorded during this period. The megaturbidite T8 contains remobilized volcanic material (i.e., dark layers containing volcanic glass and quartz, **Figure. 5**) at its base that shares a similar geochemical composition than Rel-Tp. Therefore, the presence of a large amount of volcanic material falling into the Reloncaví fjord watershed could have been remobilised, forming a thicker deposit during the following earthquake. A similar phenomenon occurred in Lake Icalma (39°S) after the late Holocene eruption of the Sollipulli volcano around 3,000 cal BP (Bertrand et al., 2008b).

6. CONCLUSION

This study reconstructed the (paleo)earthquakes based on the analysis of the physical, magnetic and sedimentological properties of sediment cores collected from the Reloncavi Fjord (Chile) and the proglacial lakes Frías and Mascardi (Argentina) in northern Patagonia.

The 29-m long Calypso piston core MD07-3107 collected in the Reloncaví Fjord, dating back to the last 8,700 cal BP according to our radiocarbon-based age-depth model, allows us to identify up to 17 (mega-)turbidites interbedded with thin contourites related to a

drift deposit. Among these deposits, 13 can be associated with earthquakes causing the full rupture of the Valdivia tectonic segment based on correlations with regional paleoseismic sites, with six during the last two millennia yielding a recurrence interval of 342 ± 153 (1σ) for this period. This new Holocene-long record in the northern part of the Valdivia tectonic segment, compared to the past records from different sites, provides a broad-scope study of the impact of earthquakes in this region and reveal two aseismic periods in ~ 4600 - 5500 cal BP and ~ 5500 - 7200 cal BP. Furthermore, the formation of megaturbidites over the last 2,000 years may be related to changes in the sedimentary dynamic along the Puelo delta, affecting its stability. Additionally, a tephra likely deposited by an early-mid Holocene eruption of the Calbuco volcano coupled to a similar geochemical signature derived from remobilised volcanic layers in the subsequent megaturbidite, suggest that this event may have increase the amount of available sediment, thereby enabling the sedimentation of a thicker deposit.

On the Argentine side of the Andes, short lacustrine cores collected in the distal basin of Lake Frías and in proximal setting of Lake Mascardi, both recovered evidence of the AD 1960 earthquake, in the form of a megaturbidite and a debris flow deposit, respectively. The older turbidites identified in Lake Frías might have been trigger by the smaller historical subduction earthquakes, such as the AD 1737 and 1748 earthquakes, allowing to precise the rupture limit of these events. Moreover, core Masc-90424 also illustrates the sensitivity of Lake Mascardi to sediment inputs from the Ventisquero Negro via the Manso delta. Finally, these results highlight the potential of these piedmont glacial lakes for paleoseismic reconstructions and the need to study longer sedimentary archives.

7. ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the captain, officers, crew and scientific participants on board the R/V Marion Dufresne II during the MD/159 Pachiderme Expedition (IMAGES XV program) for collecting core MD07-3107 in 2007 in Reloncaví Fjord presented in this study. Marc Desmet (Tours University, France) is warmly acknowledged for his implication in the Pachiderme expedition and his contribution to the XRF measurements as well as the AMS

radiocarbon dating of samples from the Reloncavi fjord cores. We are also thankful for the members of the ANR ESCARSEL project, for performing the multibeam bathymetric survey and collecting core FR08-3 in 2008 in Lake Frías. We also thank Quentin Beauvais (ISMER-UQAR), Claude Belzile (ISMER-UQAR) and Pascal Rioux (ISMER-UQAR) for their help in the laboratory to analyse core Masc-90424.

This research was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) with a Discovery Grant to G. S. and a grant from the Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies in the framework of the Recovery trajectories of Societies to natural Disasters (RISCDIS) International Research Network (IRN) funded by the *Centre national de la recherche scientifique* (CNRS). N. C. acknowledges a M.Sc. scholarship from G. S. and *Institut des sciences de la mer* (ISMER). Finally, we acknowledge the financial support provided by *Québec Océan*.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire de maîtrise a permis la reconstitution des (paléo)séismes au sud de la zone de subduction du Chili, dans le segment tectonique de Valdivia, à partir de l'analyse de carottes sédimentaires marines et lacustres provenant d'un fjord et de trois lacs proglaciaires situés au nord de la Patagonie argentine et chilienne. Plus particulièrement, le Chapitre 1 de ce mémoire visait l'étude d'une longue carotte sédimentaire Calypso de ~29 m récoltée dans le fjord de Reloncaví, permettant un long enregistrement paléosismologique s'étendant sur la majeure partie de l'Holocène, ainsi que deux carottes courtes prélevées dans les lacs Frías (167 cm) et Mascardi (51 cm), permettant d'étudier les événements sismiques sur une période plus récente. La récolte lors d'une récente mission en mars 2024 et l'analyse en laboratoire à l'ISMER de six carottes sédimentaires prélevées en contexte deltaïque proximal au lac Puelo font également parti de ces travaux de recherche.

L'approche méthodologique de cette étude s'appuyait sur trois objectifs spécifiques. Tout d'abord, l'analyse en continu des propriétés physiques, magnétiques, géochimiques et sédimentologiques le long des différentes carottes ont permis l'identification de plusieurs types de dépôts sédimentaires. Pour la carotte MD07-3107 du fjord de Reloncaví, 31 RDL ont été identifiées et divisées en 5 faciès sédimentaires d'après leurs propriétés respectives : les mégaturbidites, les turbidites sableuses, les contourites (dépôts associés aux courants de contour provenant de la baie de Reloncaví), un dépôt de tsunami historique et un téphra. Les carottes lacustres ont, quant à elles, révélées la sédimentation de différents types de dépôts selon leur emplacement au sein des lacs proglaciaires. La carotte FR08-3, récoltée dans la partie distale du lac Frías, a préservé une mégaturbidite et des turbidites présentant des sommet argileux (*clay cap*), des faciès homogènes avec un granoclassement normal, et parfois, des bases érosives à granulométrie grossière. La carotte Masc-90424, récoltée dans la partie proximale du lac, à un kilomètre du delta Manso, présente des dépôts plus grossiers intercalés entre les sédiments hémipélagiques laminés, témoignant de la recharge en eau de

fonte du Cerro Tronador dans cette partie du lac. Pour finir, les carottes du lac Puelo, récoltées près du delta de la rivière Turbio (**Figure XB**), contiennent des dépôts sommitaux épais sans laminations présentant des débris de macrorestes végétaux, issus de la remobilisation par la dynamique sédimentaire deltaïque. La carotte LP24-05 récoltée plus distalement au delta Epuén, a préservé un horizon de téphra.

Par la suite, une combinaison de méthodes de datations a été utilisée afin de dater ces séquences sédimentaires. Le modèle d'âge de la carotte MD07-3107 du fjord de Reloncaví, basé sur les âges ^{14}C et appuyé par les interprétations sur sa carotte jumelle MD07-3108 (St-Onge et al., 2012) a permis de remonter jusqu'à près de 9000 ans. Pour les carottes lacustres, une combinaison d'âges ^{14}C et de mesures de l'activité anthropique du ^{137}Cs ont été utilisées afin d'élaborer les modèles d'âges. La carotte sédimentaire FR08-3 du lac Frías permet de retracer la période historique (c'est-à-dire les derniers ~400 ans), alors que la carotte Masc-90424 couvre la période récente des derniers ~65 ans. Pour les carottes du lac Puelo, une combinaison d'âge ^{14}C , de mesures des radionucléides ^{210}Pb et ^{137}Cs , la téphrochronologie et le paléomagnétisme est envisagée afin de dater les carottes sédimentaires d'intérêt.

Pour finir, les âges des dépôts retrouvés dans les carottes sédimentaires du fjord de Reloncaví, du lac Frías et du lac Mascardi ont été comparés aux séismes historiques régionaux et aux séismes documentés par des études paléosismiques et tsunamigéniques régionales. Ces comparaisons avec la sismicité régionale nous a permis de 1) confirmer les séismes comme mécanisme d'origine des RDL retrouvées dans les carottes suivant l'hypothèse de la synchronicité des dépôts lors d'événements sismiques, 2) raffiner les précédentes hypothèses précédentes quant aux zones de rupture des grands séismes historiques régionaux (c'est-à-dire les séismes de 1960, 1837, 1737 et 1575) et 3) de proposer une nouvelle récurrence quant aux événements sismiques régionaux similaires au séisme de 1960 (c'est-à-dire causant la rupture complète du segment tectonique) de 342 ± 153 ans pour les derniers 2000 ans, qui est cohérente avec la récurrence retrouvée dans les autres études paléosismiques de ce secteur.

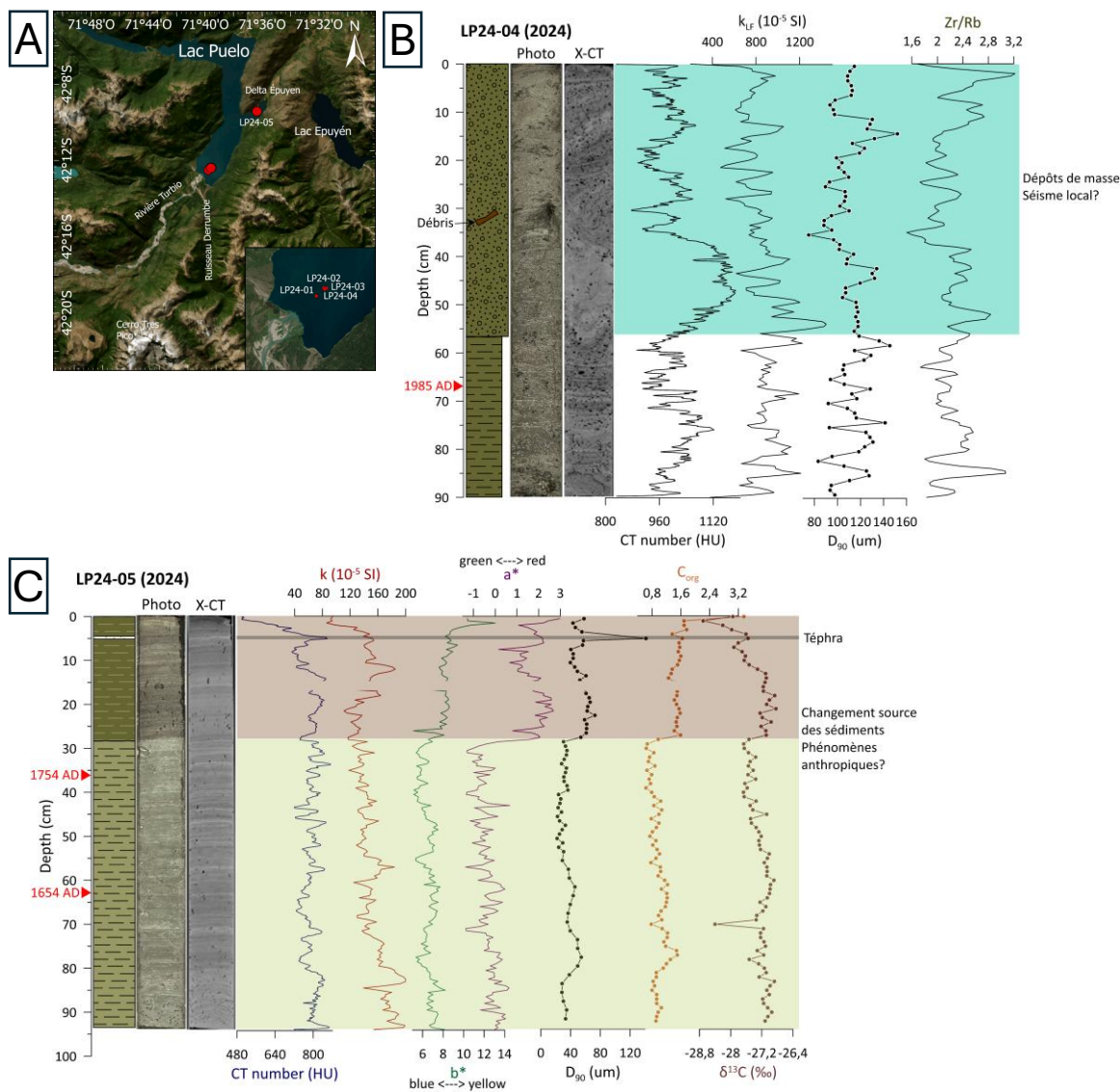


Figure X A) Localisation des carottes récoltées dans le lac Puelo. Résultats de l'analyse multi-traceurs sur les carottes B) LP24-04 et C) LP24-05. Les triangles rouges indiquent les âges ^{14}C calibrés.

Les carottes sédimentaires récoltées au lac Puelo permettront également d'apporter de nouvelles perspectives sur la paleosismologie et la téphrochronologie lacustre. L'étude d'un téphra identifié au sommet de la carotte LP24-05 (**Figure XC**), possiblement déposé à la suite de l'éruption du volcan Chaitén en 2008 (Watt et al., 2009), permet de confirmer la sensibilité de ce lac à l'activité volcanique sur une grande distance grâce aux vents

dominants. De plus, des dépôts de masse retrouvés au sommet des carottes LP24-03 et LP24-04 (**Figure XB**) auraient possiblement été déclenchés par un séisme local (M_w 4,9) survenu dans la localité de Lago Puelo en 2017 (Communication personnelle, *Parque Nacional Lago Puelo*, 2024). Cette hypothèse permet de déduire que ces carottes ont été récoltées de façon trop proximale au delta Turbio, dans une zone où la dynamique sédimentaire deltaïque empêche la préservation de traces des grands séismes de subduction régionaux et/ou perturbe leur signal sédimentaire par des séismes locaux. Pour finir, les mesures paléomagnétiques en cours de traitement sur la carotte LP24-05 pourront éventuellement servir à supporter le modèle d'âge élaboré par les analyses au ^{14}C et au ^{210}Pb .

Finalement, ce mémoire de maîtrise permet d'ajouter aux connaissances sur la paléosismicité au sein du segment tectonique de Valdivia en étudiant les événements sismiques à différentes échelles temporelles : Holocène, historique et récente. L'emplacement clef de ce fjord et de ces lacs au nord de la Patagonie, à proximité des épicentres des séismes de subduction historiques régionaux, et leur fort taux de sédimentation permet de préserver et d'étudier avec haute résolution les dépôts déclenchés par les séismes. L'ajout d'un long enregistrement paléosismique Holocène dans la partie nord du segment tectonique de Valdivia permet de confirmer ou de discuter des hypothèses émises par les précédentes études paléosismiques de la région. Également, la variété des sites de carottage lacustres permet aussi de déterminer les plus favorables à la préservation de ces dépôts. Ainsi, la récolte d'autres carottes sédimentaires courtes et longues dans les parties distales des lacs Frías, Mascardi et Puelo permettrait de confirmer l'origine des RDL identifiées dans cette étude et de reconstituer les événements sismiques et volcaniques sur une plus longue période.

ANNEXES

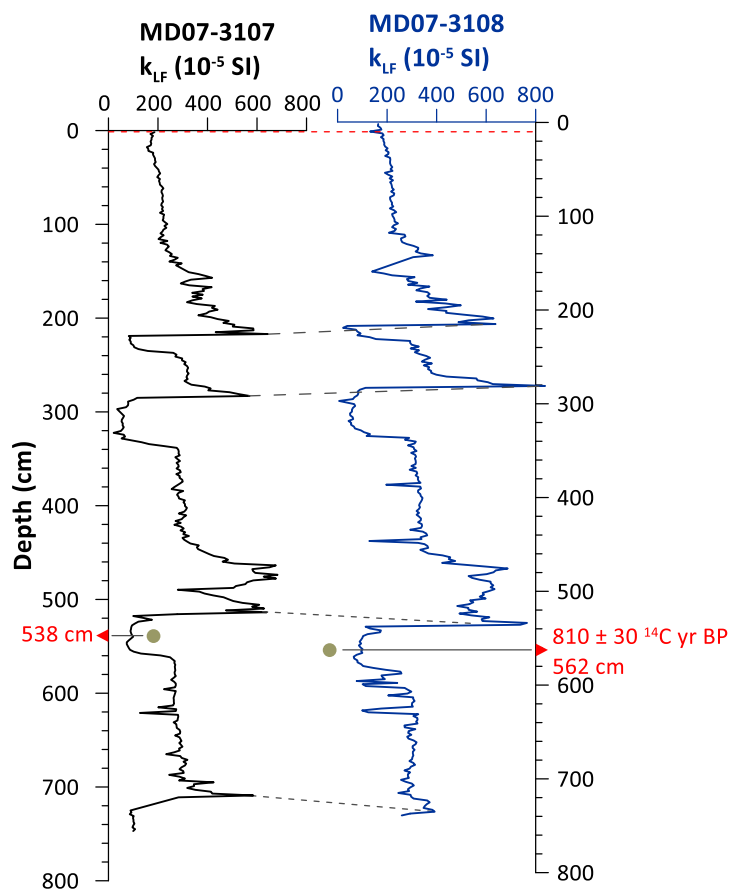


Figure. S1 Correlation between core MD07-3108 and core MD07-3107 based on the magnetic susceptibility (k_{LF}) values along both cores. The ^{14}C age recovered at 562-cm depth in core MD07-3108 was correlated at 538-cm in core MD07-3107.

Table S1 The geochemical composition in major elements of samples took from core MD07-3107 (Reloncavi Fjord). Sample MD07-3107-2795 was collected in the tephra layer Rel-Tp, whereas samples MD07-3107-2765 and MD07-3107-2755 were collected in the base of megaturbidite T8.

	MD07-3107-2795		MD07-3107-2765		MD07-3107-2755	
	1	2	1	2	1	2
SiO ₂	61,60	58,50	59,10	58,10	59,30	59,10
TiO ₂	0,60	0,80	0,50	0,80	0,70	0,70
Al ₂ O ₃	17,50	17,20	18,30	16,90	21,60	16,50
Fe ₂ O ₃	6,80	7,40	6,70	7,70	6,00	8,10
MnO	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
MgO	2,90	3,50	2,80	4,00	2,30	4,50
CaO	4,80	7,80	7,40	7,80	4,90	6,30
Na ₂ O	3,70	3,40	3,40	3,30	3,50	3,30
K ₂ O	1,60	1,10	1,40	1,10	1,40	1,30
P ₂ O ₅	0,30	0,20	0,30	0,20	0,20	0,20
Sum	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Table S2 The geochemical composition in major elements of glass shards sampled in the coarse base of turbidite Fr3 from core FR08-3 (Lake Frias).

	LF-Tp							
Points	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	54,65	54,20	53,44	54,71	54,35	54,27	54,44	52,55
TiO ₂	1,21	1,22	1,33	1,25	1,23	1,43	1,22	1,43
Al ₂ O ₃	15,17	15,00	14,82	15,11	14,92	15,14	15,14	14,98
Fe ₂ O ₃	11,02	11,38	11,85	10,66	11,22	11,53	11,11	11,68

MnO	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16	0,21	0,17	0,19
MgO	5,29	5,39	5,54	5,06	5,29	4,74	5,15	5,42
CaO	8,53	8,62	8,87	8,34	8,56	8,11	8,46	9,43
Na ₂ O	3,10	3,19	3,03	3,81	3,42	3,52	3,46	3,31
K ₂ O	0,67	0,65	0,72	0,70	0,68	0,85	0,69	0,74
P ₂ O ₅	0,13	0,11	0,16	0,14	0,10	0,15	0,10	0,20
Cl	0,06	0,06	0,08	0,07	0,08	0,06	0,06	0,08
Sum	100	100	100	100	100	100	100	100

	Fr-Tp						
	9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	54,42	53,81	53,77	54,28	54,32	54,33	54,64
TiO ₂	1,22	1,12	1,11	1,25	1,54	1,33	1,44
Al ₂ O ₃	15,00	15,72	15,78	15,14	13,73	15,47	14,49
Fe ₂ O ₃	11,24	10,32	10,30	11,22	12,51	10,91	11,98
MnO	0,12	0,15	0,13	0,13	0,17	0,16	0,16
MgO	5,28	5,68	5,71	5,28	4,91	5,00	5,04
CaO	8,49	9,23	9,19	8,46	8,47	8,51	7,88
Na ₂ O	3,40	3,14	3,19	3,39	3,26	3,31	3,33
K ₂ O	0,67	0,65	0,65	0,66	0,82	0,75	0,79
P ₂ O ₅	0,11	0,12	0,13	0,12	0,20	0,17	0,19
Cl	0,04	0,06	0,04	0,06	0,07	0,06	0,07
Sum	100	100	100	100	100	100	100

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

*Référence figurant uniquement dans l'introduction générale et/ou la conclusion générale

Adams, J. (1990). Paleoseismicity of the Cascadia subduction zone: Evidence from turbidites off the Oregon-Washington margin. *Tectonics*, 9(4), 569-583. <https://doi.org/10.1029/TC009i004p00569>*

Alloway, B. V., Pearce, N. J., Moreno, P. I., Villarosa, G., Jara, I., De Pol-Holz, R., & Outes, V. (2017). An 18,000 year-long eruptive record from Volcano Chaitén, northwestern Patagonia: Paleoenvironmental and hazard-assessment implications. *Quaternary Science Reviews*, 168, 151-181. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.05.011>

Alloway, B. V., Pearce, N. J., Moreno, P. I., Villarosa, G., Jara, I. A., Henríquez, C. A., Sagredo, E. A., Ryan, M. T., & Outes, V. (2022). Refinement of the tephrostratigraphy straddling the northern Patagonian Andes (40–41° S): new tephra markers, reconciling different archives and ascertaining the timing of piedmont deglaciation. *Journal of Quaternary Science*, 37(3), 441-477. <https://doi.org/10.1002/jqs.3389>

Ariztegui, D., Bianchi, M. M., Masferro, J., Lafargue, E., & Niessen, F. (1997). Interhemispheric synchrony of Late-glacial climatic instability as recorded in proglacial Lake Mascardi, Argentina. *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association*, 12(4), 333-338. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1417\(199707/08\)12:4%3C333::AID-JQS312%3E3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1417(199707/08)12:4%3C333::AID-JQS312%3E3.0.CO;2-0)

Ariztegui, D., Anselmetti, F. S., Kelts, K., Seltzer, G. O., & D'Agostino, K. (2001). Identifying Paleoenvironmental Change Across South and North America Using High-Resolution Seismic Stratigraphy in Lakes. *Interhemispheric Climate Linkages*, 227–240. <https://doi.org/10.1016/B978-012472670-3/50017-3>

- Ariztegui, D., Bösch, P., & Davaud, E. (2007). Dominant ENSO frequencies during the Little Ice Age in Northern Patagonia: the varved record of proglacial Lago Frías, Argentina. *Quaternary International*, 161(1), 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.022>
- Ariztegui, D., Anselmetti, F. S., Gilli, A., & Waldmann, N. (2008). Late Pleistocene environmental change in Eastern Patagonia and Tierra del Fuego—A limnogeological approach. *Developments in Quaternary Sciences*, 11, 241-253. [https://doi.org/10.1016/S1571-0866\(07\)10011-7](https://doi.org/10.1016/S1571-0866(07)10011-7)
- Arnaud, F., Magand, O., Chapron, E., Bertrand, S., Boës, X., Charlet, F., & Mélières, M. A. (2006). Radionuclide dating (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am) of recent lake sediments in a highly active geodynamic setting (Lakes Puyehue and Icalma—Chilean Lake District). *Science of the Total Environment*, 366(2-3), 837-850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.08.013>
- Belzile, C., & Montero-Serrano, J. C. (2022). Quantifying simulated fine sand fraction in muddy sediment using laser diffraction. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 59(7), 455-461. <https://doi.org/10.1139/cjes-2022-0011>
- Bertrand, S., Castiaux, J., & Juvigné, E. (2008a). Tephrostratigraphy of the late glacial and Holocene sediments of Puyehue Lake (southern volcanic zone, Chile, 40 S). *Quaternary Research*, 70(3), 343-357. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.06.001>
- Bertrand, S., Charlet, F., Chapron, E., Fagel, N., & De Batist, M. (2008b). Reconstruction of the Holocene seismotectonic activity of the Southern Andes from seismites recorded in Lago Icalma, Chile, 39°S. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259(2-3), 301-322. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.013>
- Bertrand, S., Daga, R., Bedert, R., & Fontijn, K. (2014). Deposition of the 2011–2012 Cordon Caulle tephra (Chile, 40°S) in lake sediments: Implications for tephrochronology and

- volcanology. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(12), 2555-2573.
<https://doi.org/10.1002/2014JF003321>
- Bianchi, M. M., & Ariztegui, D. (2012). Vegetation history of the Río Manso Superior catchment area, Northern Patagonia (Argentina), since the last deglaciation. *The Holocene*, 22(11), 1283-1295. <https://doi.org/10.1177/0959683611405083>
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Bouma, A.H., 1962. Sedimentology of Some Flysch Deposits. A Graphic Approach to Facies Interpretation. Elsevier, Amsterdam.
- Brooks, G. R. (2020). Evidence of a strong paleoearthquake in~ 9.1 ka cal BP interpreted from mass transport deposits, western Quebec–northeastern Ontario, Canada. *Quaternary Science Reviews*, 234, 106250. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106250>
- Castillo, M. I., Pizarro, O., Cifuentes, U., Ramirez, N., & Djurfeldt, L. (2012). Subtidal dynamics in a deep fjord of southern Chile. *Continental Shelf Research*, 49, 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.09.007>
- Castillo, M. I., Cifuentes, U., Pizarro, O., Djurfeldt, L., & Caceres, M. (2016). Seasonal hydrography and surface outflow in a fjord with a deep sill: the Reloncaví fjord, Chile. *Ocean Science*, 12(2), 533-544. <https://doi.org/10.5194/os-12-533-2016>
- 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. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00066-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00066-6)
- Chapron, E., Beck, C., Pourchet, M., & Deconinck, J. F. (1999). 1822 earthquake-triggered homogenite in Lake Le Bourget (NW Alps). *Terra Nova*, 11(2-3), 86-92. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.1999.00230.x>

- 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>
- Chapron, E., Juvignié, E., Mulsow, S., Ariztegui, D., Magand, O., Bertrand, S., Pino, M., & Chapron, O. (2007). Recent clastic sedimentation processes in Lake Puyehue (Chilean Lake District, 40.5°S). *Sedimentary Geology*, 201(3-4), 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.07.006>
- Chassiot, L., Chapron, E., Di Giovanni, C., Lajeunesse, P., Tachikawa, K., Garcia, M., & Bard, E. (2016). Historical seismicity of the Mont Dore volcanic province (Auvergne, France) unraveled by a regional lacustrine investigation: new insights about lake sensitivity to earthquakes. *Sedimentary Geology*, 339, 134-150. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.04.007>*
- Cifuentes, I. L. (1989). The 1960 Chilean earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B1), 665-680. <https://doi.org/10.1029/JB094iB01p00665>
- Cisternas, M., Atwater, B. F., Torrejón, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., Eipert, A., Youlton, C., Salgado, I., Kamataki, T., Shishikura, M., Rajendran, C. P., Malik, J. K., Rizal, Y., & Husni, M. (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*, 437(7057), 404-407. <https://doi.org/10.1038/nature03943>
- Cisternas, M., Carvajal, M., Wesson, R., Ely, L. L., & Gorioitia, N. (2017a). Exploring the historical earthquakes preceding the giant 1960 Chile earthquake in a time-dependent seismogenic zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(6), 2664-2675. <https://doi.org/10.1785/0120170103>
- Cisternas, M., Garrett, E., Wesson, R., Dura, T., & Ely, L. L. (2017b). Unusual geologic evidence of coeval seismic shaking and tsunamis shows variability in earthquake size and recurrence in the area of the giant 1960 Chile earthquake. *Marine Geology*, 385, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.12.007>

- Clapperton, C. M. (1994). The quaternary glaciation of Chile: a review. *Revista Chilena de Historia Natural*, 67(4), 369-383.*
- Colavitto, B., Allen, S., Winocur, D., Dussaillant, A., Guillet, S., Manchado, A. M. T., Gorsic, S., & Stoffel, M. (2024). A glacial lake outburst floods hazard assessment in the Patagonian Andes combining inventory data and case-studies. *Science of the total environment*, 916, 169703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169703>
- Crozier, M. J., Deimel, M. S., & Simon, J. S. (1995). Investigation of earthquake triggering for deep-seated landslides, Taranaki, New Zealand. *Quaternary International*, 25, 65-73. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(94\)00036-5](https://doi.org/10.1016/1040-6182(94)00036-5)*
- Davies, B. J., Darvill, C. M., Lovell, H., Bendle, J. M., Dowdeswell, J. A., Fabel, D., Garcia, J-L., Geiger, A., Glasser, N. F., Gheorghui, D. M., Harrison, S., Hein, A. S., Kaplan, M. R., Martin, J. R. V., Mendelova, M., Palmer A., Pelto, M., Rodés, A., Sagredo, E. A., Smedley, R. K., Smellie, J. L., & Thorndycraft, V. R. (2020). The evolution of the Patagonian Ice Sheet from 35 ka to the present day (PATICE). *Earth-Science Reviews*, 204, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103152>*
- DeMets, C., Gordon, R. G., & Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical journal international*, 181(1), 1-80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>*
- Duarte, J. C., & Schellart, W. P. (2016). Introduction to plate boundaries and natural hazards. *Plate Boundaries and Natural Hazards*, 1-10. <https://doi.org/10.1002/9781119054146.ch1>*
- Eaton, J. P., Richter, D. H., & Ault, W. U. (1961). The tsunami of May 23, 1960, on the Island of Hawaii. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 51(2), 135-157. <https://doi.org/10.1785/BSSA0510020135>

- Faugères, J. C., & Stow, D. A. (1993). Bottom-current-controlled sedimentation: a synthesis of the contourite problem. *Sedimentary Geology*, 82(1-4), 287-297. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90127-Q](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90127-Q)
- Fortin, D., Praet, N., McKay, N. P., Kaufman, D. S., Jensen, B. J., Haeussler, P. J., Buchanan, C., & De Batist, M. (2019). New approach to assessing age uncertainties—The 2300-year varve chronology from Eklutna Lake, Alaska (USA). *Quaternary Science Reviews*, 203, 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.018>
- Foucher, A., Chaboche, P.-A., Sabatier, P., & Evrard, O. (2021). A worldwide meta-analysis (1977–2020) of sediment core dating using fallout radionuclides including ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$. *Earth System Science Data*, 13, 4951–4966, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4951-2021>
- Garrett, E., Shennan, I., Woodroffe, S. A., Cisternas, M., Hocking, E. P., & Gulliver, P. (2015). Reconstructing paleoseismic deformation, 2: 1000 years of great earthquakes at Chucalén, south central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 113, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.010>
- Garrett, E., Melnick, D., Dura, T., Cisternas, M., Ely, L. L., Wesson, R. L., Jara-Muñoz, Julius., & Whitehouse, P. L. (2020). Holocene relative sea-level change along the tectonically active Chilean coast. *Quaternary Science Reviews*, 236, 106281. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106281>
- Gastineau, R., Sabatier, P., Fabbri, S. C., Anselmetti, F. S., Roeser, P., Findling, N., Sahin, M., Gündüz, S., Arnaud, F., Franz, S. O., Ünsal, N. D., & De Sigoyer, J. (2024). Lateral variations in the signature of earthquake-generated deposits in Lake Iznik, NW Turkey. *The Depositional Record*, 10(5), 470-495. <https://doi.org/10.1002/dep2.232>
- Goldfinger, C., Nelson, C. H., Morey, A. E., Johnson, J. E., Patton, J. R., Karabanov, E. B., Gutierrez-Pastor, J., Eriksson, A.T., Gracia, E., Dunhill, G., Randolph, J. E., Dallimore, A., & Vallier, T. (2012). Turbidite event history—Methods and

- implications for Holocene paleoseismicity of the Cascadia subduction zone. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1661-F.
- Gusiakov, V. K., Beisel, S. A., Gusev, O. I., Lander, A. V., Chebrov, D. V., & Chubarov, L. B. (2024). Assessment of Tsunami Hazard for the Coast of Oktyabrsky Spit, Western Kamchatka Based on Results of Numerical Modeling. *Journal of Volcanology and Seismology*, 18(5), 432-445. <https://doi.org/10.1134/S0742046324700751>*
- Guyard, H., St-Onge, G., Chapron, E., Anselmetti, F. S., & Francus, P. (2007). The AD 1881 earthquake-triggered slump and late Holocene flood-induced turbidites from Proglacial Lake Bramant, Western French Alps. In *Submarine Mass Movements and Their Consequences: 3 International Symposium* (pp. 279-286). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6512-5_29
- Heaton, T. J., Köhler, P., Butzin, M., Bard, E., Reimer, R. W., Austin, W. E. N., Bronk Ramsey, C., Grootes, P. M., Hughen, K. A., Kromer, B., Reimer, P. J., Adkins, J., Burke, A., Cook, M. S., Olsen, J., & Skinner, L. C. (2020). Marine20—The Marine Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55,000 cal BP). *Radiocarbon*, 62(4), 779-820. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.68>
- Hocking, E. P., Garrett, E., Aedo, D., Carvajal, M., & Melnick, D. (2021). Geological evidence of an unreported historical Chilean tsunami reveals more frequent inundation. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 245. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00319-z>
- Hogg, A. G., Heaton, T. J., Hua, Q., Palmer, J. G., Turney, C. S., Southon, J., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Boswijk, G., Bronk Ramsey, C., Pearson, C., Petchey, F., Reimer, P., Reimer, R., & Wacker, L. (2020). SHCal20 Southern Hemisphere calibration, 0–55,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 62(4), 759-778. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.59>
- Howarth, J. D., Orpin, A. R., Kaneko, Y., Strachan, L. J., Nodder, S. D., Mountjoy, J. J., Barnes, P. M., Bostock, H. C., Holden, C., Jones, K., & Çağatay, M. N. (2021).

- Calibrating the marine turbidite palaeoseismometer using the 2016 Kaikōura earthquake. *Nature Geoscience*, 14(3), 161-167. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00692-6>
- Ikehara, K., Kanamatsu, T., Nagahashi, Y., Strasser, M., Fink, H., Usami, K., Irino, T., & Wefer, G. (2016). Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-oki earthquake from sediments deposited in the Japan Trench over the past 1500 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 445, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.04.009>
- Katô, Y., Suzuki, Z., Nakamura, K., Takagi, A., Emura, K., Ito, M., & Isida, H. (1961). *The Chile tsunami of 1960 observed along the Sanriku coast of Japan* (Doctoral dissertation, Tohoku University).
- Kelleher, J., Sykes, L., & Oliver, J. (1973). Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean. *Journal of Geophysical Research*, 78(14), 2547-2585. <https://doi.org/10.1029/JB078i014p02547>*
- Kempf, P., Moernaut, J., Van Daele, M., Vandoorne, W., Pino, M., Urrutia, R., & De Batist, M. (2017). Coastal lake sediments reveal 5500 years of tsunami history in south central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 161, 99-116. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.02.018>
- Kempf, P., Moernaut, J., Van Daele, M., Pino, M., Urrutia, R., & De Batist, M. (2020). Paleotsunami record of the past 4300 years in the complex coastal lake system of Lake Cucao, Chiloé Island, south central Chile. *Sedimentary Geology*, 401, 105644. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105644>
- Kissel, C., Leau, H., & the shipboard scientific party (Abarzua, A. M., Arz, H., Avila-Santis, A., Bretel, P., Caillon, N., Caniupan, M., Castera, M-H., Cazet, J-P., Chapron, E., Debret, M., Desmet, M., Dezileau, L., Euler, C., Førde, A-E., François, J-P., Gonzales, J., Gourdon, P., Guérin, C., Hadoux, V., Jaouen, A., Jean Baptiste, V., Kaiser, J.,

- Kilian, R., Laj, C., Lamy, F., Lange, C., Lebourg, L., León Guerrero, T. J., Londeix, L., Løtvedt, I., Michel, E., Morin, X., Mulsow, S., Nebout-Combourieu, N., Ninneman, U., Ovando Gutierrez, G., Rebolledo, L., Rousset, J-M., Sabatier, P., Sangiardi, P., Siani, G., Turon, J-L., Van Toer, A., Viel, M., Wandres, C., & Winiarski, T.). (2007). *MD159-PACHIDERME-IMAGES VX – Les rapports de campagne à la mer – Pacifique Chili dynamique des eaux intermédiaires à bord du Marion Dufresne* (Réf. OCE/2007/01). [Cruise Report and Data Report]. Institut polaire français Paul-Émile Victor, éd., Plouzané, France.
- Lajeunesse, P., Sinkunas, B., Morissette, A., Normandeau, A., Joyal, G., St-Onge, G., & Locat, J. (2017). Large-scale seismically-induced mass-movements in a former glacial lake basin: Lake Témiscouata, northeastern Appalachians (eastern Canada). *Marine Geology*, 384, 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.04.007>
- Lange, D., Ruiz, J., Carrasco, S., & Manríquez, P. (2017). The Chiloé Mw 7.6 earthquake of 2016 December 25 in Southern Chile and its relation to the Mw 9.5 1960 Valdivia earthquake. *Geophysical Journal International*, 213(1), 210–221. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx514>
- 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, A., Villalba, R., & Urrutia, R. (2008). A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer–fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *Climatic Change*, 86(3), 331-356. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9287-7>
- Lario, J., Zazo, C., & Goy, J. L. (2016). Tectonic and morphosedimentary features of the 2010 Chile earthquake and tsunami in the Arauco Gulf and Mataquito River (Central Chile). *Geomorphology*, 267, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.019>

- LeBas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Legrand, D., Barrientos, S., Bataille, K., Cembrano, J., & Pavez, A. (2011). The fluid-driven tectonic swarm of Aysen Fjord, Chile (2007) associated with two earthquakes (Mw=6.1 and Mw=6.2) within the Liquiñe-Ofqui Fault Zone. *Continental Shelf Research*, 31(3-4), 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.05.008>
- Lisé-Pronovost, A., St-Onge, G., Gogorza, C., Haberzettl, T., Preda, M., Kliem, P., Francus, P., Zolitschka, B., & PASADO Science Team. (2013). High-resolution paleomagnetic secular variations and relative paleointensity since the Late Pleistocene in southern South America. *Quaternary Science Reviews*, 71, 91-108. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.05.012>*
- Lomnitz, C. (2004). Major earthquakes of Chile: a historical survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 75(3), 368-378. <https://doi.org/10.1785/gssrl.75.3.368>
- López-Escobar, L., Parada, M. A., Moreno, H., Frey, F. A., & Hickey-Vargas, R. L. (1992). A contribution to the petrogenesis of Osomo and Calbuco volcanoes, Southern Andes (41° 00'-41° 30'S): comparative study. *Andean Geology*, 19(2), 211-226.
- 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/BF00286934>
- MacInnes, B., Kravchunovskaya, E., Pinegina, T., & Bourgeois, J. (2016). Paleotsunamis from the central Kuril Islands segment of the Japan-Kuril-Kamchatka subduction

- zone. *Quaternary Research*, 86(1), 54-66.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2016.03.005>*
- Martinez Fontaine, C. M., Siani, G., Delpech, G., Michel, E., Villarosa, G., Manssouri, F., & Nouet, J. (2021). Post-glacial tephrochronology record off the Chilean continental margin (~41°S). *Quaternary Science Reviews*, 261, 106928.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106928>
- Martinez Fontaine, C. M., Peña-Araya, V., Marmo, C., Le Morvan, M., Delpech, G., Fontijn, K., Siani, G., & Cosyn-Wexsteen, L. (2023). BOOM! Tephrochronological dataset and exploration tool of the Southern (33–46° S) and Austral (49–55° S) volcanic zones of the Andes. *Quaternary Science Reviews*, 316, 108254.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108254>
- Melnick, D., Bookhagen, B., Strecker, M. R., & Echtler, H. P. (2009). Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco peninsula, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1). <https://doi.org/10.1029/2008JB005788>
- Mérindol, M., St-Onge, G., Sultan, N., Lajeunesse, P., & Garziglia, S. (2022). Earthquake-triggered submarine landslides in the St. Lawrence Estuary (Quebec, Canada) during the last two millennia and the record of the major 1663 CE $M \geq 7$ event. *Quaternary Science Reviews*, 291, 107640. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107640>
- Merino-Campos, V., De Pol-Holz, R., Southon, J., Latorre, C., & Collado-Fabbri, S. (2019). Marine radiocarbon reservoir age along the Chilean continental margin. *Radiocarbon*, 61(1), 195-210. <https://doi.org/10.1017/RDC.2018.81>
- Moernaut, J., De Batist, M., Charlet, F., Heirman, K., Chapron, E., Pino, M., Brümmer, R., & Urrutia, R. (2007). Giant earthquakes in South-Central Chile revealed by Holocene mass-wasting events in Lake Puyehue. *Sedimentary Geology*, 195(3-4), 239-256.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.08.005>

- Moernaut, J., Daele, M. V., Heirman, K., Fontijn, K., Strasser, M., Pino, M., Urrutia, R., & De Batist, M. (2014). Lacustrine turbidites as a tool for quantitative earthquake reconstruction: New evidence for a variable rupture mode in south central Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 1607-1633. <https://doi.org/10.1002/2013JB010738>
- Moernaut, J., Van Daele, M., Fontijn, K., Heirman, K., Kempf, P., Pino, M., Valdebenito, G., Urrutia, R., Strasser, M., & De Batist, M. (2018). Larger earthquakes recur more periodically: New insights in the megathrust earthquake cycle from lacustrine turbidite records in south-central Chile. *Earth and Planetary Science Letters*, 481, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.016>
- Moernaut, J., Howarth, J., Kremer, K., Wils, K. (2025). Lacustrine Records of Past Seismic Shaking. In: *Elliott, A., Gruetzner, C. (eds) Understanding Past Earthquakes. Springer, Cham.* https://doi.org/10.1007/978-3-031-73580-6_7*
- Montade, V., Nebout, N. C., Chapron, E., Mulsow, S., Abarzua, A. M., Debret, M., Foucher, A., Desmet, M., Winiarsky, T., & Kissel, C. (2012). Regional vegetation and climate changes during the last 13 kyr from a marine pollen record in Seno Reloncaví, southern Chile. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 181, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.04.005>
- Moreiras, S. M., Correas-Gonzalez, M., Colavitto, B., Quesada, A., & Jeanneret, P. (2024). Lake-related hazards: a review for understanding historical glacial and landslide lake outburst floods in the Argentinean Andes. *Journal of Paleolimnology*, 72(2), 109-127. <https://doi.org/10.1007/s10933-024-00336-w>
- Moreno, H., Lara, L., & Orozco, G. (2010). *Geología del volcán Osorno, Región de Los Lagos*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile. In: Serie Geología básica, N^o, 126. Servicio Nacional de Geología y Minería – Chile (SERNAGEOMIN), Subdirección Nacional de Geología, pp. 1–31.

- Morey, A. E., & Goldfinger, C. (2024). A 2700-year record of Cascadia megathrust and crustal/slab earthquakes from Acorn Woman Lakes, Oregon. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(12), 4563-4584. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-4563-2024>
- Mulder, T., Faugères, J. C., & Gonthier, E. (2008). Mixed turbidite–contourite systems. *Developments in sedimentology*, 60, 435-456. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(08\)10021-8](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)10021-8)
- Mulder, T., & E. Chapron. (2011). Flood deposits in continental and marine environments: Character and significance, in R. M. Slatt and C. Zavala, eds., *Sediment transfer from shelf to deep water—Revisiting the delivery system: AAPG Studies in Geology* 61, 1–30.
- 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), 224-240. <http://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200003>
- Naranjo, J. A., Singer, B. S., Jicha, B. R., Moreno, H., & Lara, L. E. (2017). Holocene tephra succession of Puyehue-Cordón Caulle and Antillanca/Casablanca volcanic complexes, southern Andes (40–41° S). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 332, 109-128. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.11.017>
- Ou, Q., Kulikova, G., & Krüger, F. (2025). Earthquake Source Parameters Determination Using Analog Seismic Records. In *Understanding Past Earthquakes* (pp. 9-51). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73580-6_2*
- Pasquini, A. I., Lecomte, K. L., & Depetris, P. J. (2008). Climate change and recent water level variability in Patagonian proglacial lakes, Argentina. *Global and Planetary Change*, 63(4), 290-298. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.07.001>
- Pasquini, A. I., Lecomte, K. L., & Depetris, P. J. (2013). The Manso Glacier drainage system in the northern Patagonian Andes: an overview of its main hydrological

- characteristics. *Hydrological Processes*, 27(2), 217-224.
<https://doi.org/10.1002/hyp.9219>
- Petersen, M. D., Harmsen, S. C., Jaiswal, K. S., Rukstales, K. S., Luco, N., Haller, K. M., Mueller, C. S., & Shumway, A. M. (2018). Seismic Hazard, Risk, and Design for South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2), 781–800.
<https://doi.org/10.1785/0120170002>
- Piret, L., Bertrand, S., Kissel, C., De Pol-Holz, R., Hernando, A. T., & Van Daele, M. (2018). First evidence of a mid-Holocene earthquake-triggered megaturbidite south of the Chile Triple Junction. *Sedimentary Geology*, 375, 120-133.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.01.002>*
- Pizer, C. O., Howarth, J. D., Clark, K. J., Orpin, A. R., Tickle, S. E., Strachan, L. J., Barnes, P., Camp, S., McKeown, M., & Twort, E. (2024). Integrated onshore–offshore paleoseismic records show multiple slip styles on the plate interface, central Hikurangi subduction margin, Aotearoa New Zealand. *Quaternary Science Reviews*, 344, 108942. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2024.108942>
- Plafker, G., & Savage, J. C. (1970). Mechanism of the Chilean earthquakes of May 21 and 22, 1960. *Geological Society of America Bulletin*, 81(4), 1001-1030.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[1001:MOTCEO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[1001:MOTCEO]2.0.CO;2)
- Porter, S. C. (1981). Pleistocene glaciation in the southern Lake District of Chile. *Quaternary Research*, 16(3), 263-292. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(81\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0033-5894(81)90013-2)*
- Praet, N., Van Daele, M., Moernaut, J., Mestdagh, T., Vandorpe, T., Jensen, B. J., Witter, R. C., Haeussler, P. J., & De Batist, M. (2022). Unravelling a 2300 year long sedimentary record of megathrust and intraslab earthquakes in proglacial Skilak Lake, south-central Alaska. *Sedimentology*, 69(5), 2151-2180. <https://doi.org/10.1111/sed.12986>
- Quesada A, Tchilinguirian P, Amoroso MM (2023) Geomorphological analysis of the active processes in the Derrumbe creek valley and its alluvial fan, Turbio river - Puelo lake

basin, northwestern of Chubut province. Argentina Rev Asoc Geol Argent 80:256–272*

Radio-Canada. (2025, juillet 30). *Alerte au tsunami levée dans le Pacifique après un séisme au large de la Russie*. ICI Radio-Canada. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/2182468/alertes-tsunami-pacifique-seisme-russie-japon-etats-unie-canada>*

Reimer, R. W., & Reimer, P. J. (2025). CALIBomb [WWW program].

Romero, J. E., Alloway, B. V., Gutiérrez, R., Bertín, D., Castruccio, A., Villarosa, G., Schipper, C. I., Guevara, A., Bustillos, J., Pisello, A., Daga, R., Montiel, M., Gleeman, E., Gonzalez, M., Morgavi, D., Ribeiro Guevara, S., & Mella, M. (2021). Centennial-scale eruptive diversity at Volcán Calbuco (41.3° S; Northwest Patagonia) deduced from historic tephra cover-bed and dendrochronologic archives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 417, 107281. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107281>

Rothwell, R., & Croudace, I. (2015). Twenty Years of XRF Core Scanning Marine Sediments: What Do Geochemical Proxies Tell Us?. In: Croudace, I., Rothwell, R. (eds) *Micro-XRF Studies of Sediment Cores. Developments in Paleoenviromental Research*, 17. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_2

Sabatier, P., Moernaut, J., Bertrand, S., Van Daele, M., Kremer, K., Chaumillon, E., & Arnaud, F. (2022). A review of event deposits in lake sediments. *Quaternary*, 5(3), 34. <https://doi.org/10.3390/quat5030034>

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>

- Schnellmann, M., Anselmetti, F. S., Giardini, D., McKenzie, J. A., & Ward, S. N. (2002). Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. *Geology*, 30(12), 1131-1134. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030%3C1131:PEHRBL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030%3C1131:PEHRBL%3E2.0.CO;2)*
- Segerstrom, K. (1964). Quaternary geology of Chile: brief outline. *Geological Society of America Bulletin*, 75(3), 157-170. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1964\)75\[157:QGOCBO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1964)75[157:QGOCBO]2.0.CO;2)*
- Seibert, C., Feuillet, N., Ratzov, G., Beck, C., Morena, P., Johannes, L., Ducassou, E., Cattaneo, A., Goldfinger, C., Moreno, E., Bieber, A., Bénâtre, G., Caron, B., Caron, M., Casse, M., Cavailhes, T., Del Manzo, G., Deschamps, C. E., Desiage, P. A., Duboc, Q., Fauquembergue, K., Ferrant, A., Guyard, H., Jacques, E., Laurencin, M., Leclerc, F., Patton, J., Saurel, J. M., St-Onge, G., Woerther, P. (2024). Sedimentary Records in the Lesser Antilles Fore-Arc Basins Provide Evidence of Large Late Quaternary Megathrust Earthquakes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25. <https://doi.org/10.1029/2023GC011152>
- Sellés, D., & Moreno, H. (2011). Geología del volcán Calbuco, Región de los Lagos. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N° 130, 1-38. Servicio Nacional de Geología y Minería – Chile (SERNAGEOMIN), Subdirección Nacional de Geología.
- SERNAGEOMIN. 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Publicación Geológica Digital, No 4 (CD-ROM, version 1.0, 2003). Santiago.
- Serra, M. N., García, M. L., Maidana, N., Villarosa, G., Lami, A., & Massaferró, J. (2016). Little ice age to present paleoenvironmental reconstruction based on multiproxy analyses from Nahuel Huapi Lake (Patagonia, Argentina). *Ameghiniana*, 53(1), 58-73. <https://doi.org/10.5710/AMGH.14.09.2015.2912>
- 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>
- Stern, C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*, 31(2), 161-206. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082004000200001>
- St-Onge, G., Mulder, T., Piper, D. J., Hillaire-Marcel, C., & Stoner, J. S. (2004). Earthquake and flood-induced turbidites in the Saguenay Fjord (Québec): a Holocene paleoseismicity record. *Quaternary Science Reviews*, 23(3-4), 283-294. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.03.001>
- St-Onge, G., Mulder, T., Francus, P., & Long, B. (2007). Chapter Two Continuous Physical Properties of Cored Marine Sediments. *Developments in marine geology*, 1, 63-98. [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01007-X](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01007-X)
- St-Onge, G., Chapron, E., Mulsow, S., Salas, M., Viel, M., Debret, M., Foucher, A., Mulder, T., Winiarski, T., Desmet, M., Costa, P.J.M., Ghaleb, B., Jaouen, A., & Locat, J. (2012). Comparison of earthquake-triggered turbidites from the Saguenay (Eastern Canada) and Reloncaví (Chilean margin) Fjords: Implications for paleoseismicity and sedimentology. *Sedimentary Geology*, 243, 89-107. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.11.003>
- Strasser, M., Anselmetti, F. S., Fäh, D., Giardini, D., & Schnellmann, M. (2006). Magnitudes and source areas of large prehistoric northern Alpine earthquakes revealed by slope failures in lakes. *Geology*, 34(12), 1005-1008. <https://doi.org/10.1130/G22784A.1>
- Strasser, M., Ikehara, K., Pizer, C., Itaki, T., Satoguchi, Y., Kioka, A., McHugh, C., Proust, J-N., Sawyer, D., IODP Expedition 386 Expedition Management Team & IODP Expedition 386 Expedition Science Party. (2024). Japan Trench event stratigraphy: First results from IODP giant piston coring in a deep-sea trench to advance subduction zone paleoseismology. *Marine Geology*, 477, 107387. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107387>

- Stuiver, M., Reimer, P. J., & Reimer, R.W. (2020). CALIB 8.2 2021 [WWW Program].
- Stuut, J. B. W., Kasten, S., Lamy, F., & Hebbeln, D. (2007). Sources and modes of terrigenous sediment input to the Chilean continental slope. *Quaternary International*, 161(1), 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.041>
- Tatur, A., del Valle, R., Bianchi, M. M., Outes, V., Villarosa, G., Niegodzisz, J., & Debaene, G. (2002). Late Pleistocene palaeolakes in the Andean and Extra-Andean Patagonia at mid-latitudes of South America. *Quaternary International*, 89(1), 135-150. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00085-4)
- U.S. Geological Survey. (2025, juillet 25). Latest earthquakes. U.S. Department of the Interior. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/*
- USGS (United States Geological Survey). (2014). M 8.8 - 36 km WNW of Quirihue, Chile – ShakeMap. Earthquake Hazard Program. Search ShakeMap Archives. <https://earthquake.usgs.gov/data/shakemap/index.php>
- Valle-Levinson, A., Sarkar, N., Sanay, R., Soto, D., & León, J. (2007). Spatial structure of hydrography and flow in a Chilean fjord, Estuario Reloncaví. *Estuaries and coasts*, 30, 113-126. <https://doi.org/10.1007/BF02782972>
- Van Daele, M., Moernaut, J., Doom, L., Boes, E., Fontijn, K., Heirman, K., Vandoorne, W., Hebbeln, D., Pino, M., Urrutia, R., Brümmer, R., & De Batist, M. (2015). A comparison of the sedimentary records of the 1960 and 2010 great Chilean earthquakes in 17 lakes: Implications for quantitative lacustrine palaeoseismology. *Sedimentology*, 62(5), 1466-1496. <https://doi.org/10.1111/sed.12193>
- Van Daele, M., Versteeg, W., Pino, M., Urrutia, R., & De Batist, M. (2013). Widespread deformation of basin-plain sediments in Aysén fjord (Chile) due to impact by earthquake-triggered, onshore-generated mass movements. *Marine Geology*, 337, 67-79. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.01.006>

- Van Daele, M., Meyer, I., Moernaut, J., De Decker, S., Verschuren, D., & De Batist, M. (2017). A revised classification and terminology for stacked and amalgamated turbidites in environments dominated by (hemi) pelagic sedimentation. *Sedimentary Geology*, 357, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.06.007>
- Vanneste, K., Wils, K., & Van Daele, M. (2018). Probabilistic evaluation of fault sources based on paleoseismic evidence from mass-transport deposits: The example of Aysén Fjord, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(11), 9842-9865. <https://doi.org/10.1029/2018JB016289>
- Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S. A., Lahsen, A., Thiele, R., Townley, B., Padilla, C., Rauld, R., Herrera, M.J., & Lara, M. (2013). Submarine earthquake rupture, active faulting and volcanism along the major Liquiñe-Ofqui Fault Zone and implications for seismic hazard assessment in the Patagonian Andes. *Andean Geology*, 40(1), 141-171. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV40n1-a07>
- Viel, M., Chapron, E., Mulsow, S., Desmet, M., Winiarski, T., & Debret, M. (2015). Evidencia de la Actividad Paleosismica y Caracterizacion de los Procesos Sedimentarios en la Cuenca Subaciatica de Reloncavi. Norpatagonia, Chile. *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*, 36, 2013-2014.
- Villalba, R., Leiva, J. C., Rubulls, S., Suarez, J., & Lenzano, L. (1990). Climate, tree-ring, and glacial fluctuations in the Rio Frias Valley, Rio Negro, Argentina. *Arctic and Alpine Research*, 22(3), 215-232. <https://doi.org/10.1080/00040851.1990.12002786>
- Villarosa, G., Outes, V., Hajduk, A., Montero, E. C., Sellés, D., Fernández, 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(1), 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

- batimétrica y sísmicas de alta resolución. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(3), 593-597.
- Watt, S. F., Pyle, D. M., & Mather, T. A. (2009a). The influence of great earthquakes on volcanic eruption rate along the Chilean subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3-4), 399-407. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.11.005>
- Watt, S. F., Pyle, D. M., Mather, T. A., Martin, R. S., & Matthews, N. E. (2009b). Fallout and distribution of volcanic ash over Argentina following the May 2008 explosive eruption of Chaitén, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B4). <https://doi.org/10.1029/2008JB006219>
- Watt, S. F., Pyle, D. M., Naranjo, J. A., Rosqvist, G., Mella, M., Mather, T. A., & Moreno, H. (2011). Holocene tephrochronology of the Hualaihue region (Andean southern volcanic zone, ~ 42°S), southern Chile. *Quaternary International*, 246(1-2), 324-343. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.05.029>
- Watt, S. F., Pyle, D. M., & Mather, T. A. (2013). Evidence of mid-to late-Holocene explosive rhyolitic eruptions from Chaitén Volcano, Chile. *Andean Geology*, 40(2), 216-226. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a02>
- Wils, K., Van Daele, M., Lastras, G., Kissel, C., Lamy, F., & Siani, G. (2018). Holocene Event Record of Aysén Fjord (Chilean Patagonia): An Interplay of Volcanic Eruptions and Crustal and Megathrust Earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1), 324-343. <https://doi.org/10.1002/2017JB014573>
- Wils, K., Van Daele, M., Kissel, C., Moernaut, J., Schmidt, S., Siani, G., & Lastras, G. (2020). Seismo-turbidites in Aysén Fjord (southern Chile) reveal a complex pattern of rupture modes along the 1960 megathrust earthquake segment. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(9). <https://doi.org/10.1029/2020JB019405>
- Worni, R., Stoffel, M., Huggel, C., Volz, C., Casteller, A., & Luckman, B. (2012). Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at

Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina). *Journal of Hydrology*, 444, 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.013>

Zolitschka, B., Francus, P., Ojala, A. E., & Schimmelmann, A. (2015). Varves in lake sediments—a review. *Quaternary Science Reviews*, 117, 1-41. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.019>

