



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

RECONSTRUCCIÓN DE PROCESOS SEDIMENTARIOS Y AMBIENTALES  
DURANTE EL HOLOCENO TEMPRANO, A PARTIR DEL ESTUDIO DE UN  
TESTIGO LACUSTRE DEL LAGO EDITA, REGIÓN DE AYSÉN.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

IGNACIO ANTONIO PINO GONZÁLEZ

PROFESORA GUÍA:

Valentina Flores Aqueveque

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

Lucía Guerra

Rodrigo Villa Martínez

Este trabajo ha sido financiado por:

Proyecto Fondecyt 1191942 y Núcleo Milenio Paleoclima

SANTIAGO DE CHILE

2023

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Geólogo  
**POR:** Ignacio Antonio Pino González  
**FECHA:** 2023  
**PROFESORA GUÍA:** Valentina Flores Aqueveque

Esta investigación consta de diferentes análisis a distintas escalas, con el objetivo de proponer una reconstrucción ambiental, centrándose en el estudio de un testigo lacustre, con el objetivo de realizar una reconstrucción de procesos sedimentarios y ambientales. La zona de estudio está ubicada en la región de Aysén, específicamente en el valle Chacabuco, donde se encuentra el Lago Edita, del cual se extrajeron testigos en una expedición del año 2009.

Primero se mapeó la zona, con el objetivo de identificar deltas emergidos y desarrollar la propuesta de distintos niveles de inundación en la zona de estudio. El testigo PC0902-CT9 es la sección con la que se trabajó a la que se le efectuaron diferentes pruebas y análisis de la granulometría estratigrafía sedimentología y geoquímica, para el estudio de procesos ambientales y sedimentarios.

Los resultados obtenidos se analizaron detalladamente para identificar tendencias y cambios en estas tendencias a lo largo del testigo. Se puso énfasis en establecer relaciones coherentes entre los diferentes resultados de las pruebas realizadas.

En primer lugar, se establecieron unidades químicas generales desde las cuales se interpretaron 3 etapas evolutivas asociadas con ambientes o agentes ambientales que rigen en la zona. Un primer ambiente glacial fue identificado en los inicios del testigo Primera etapa, Glaciar, continuando se reconocieron procesos glaciares y procesos lacustres solapados Segunda etapa, Transición y finalmente procesos de ambiente netamente lacustre se reconocieron Tercera etapa, Lacustre orgánico.

A partir de estas evidencias, se desarrolló un esquema de evolución que destaca las características ambientales distintivas de cada unidad y su cambio progresivo en el tiempo, basándose en la información proporcionada por el testigo del Lago Edita. Con esta interpretación es posible vincular el Lago Edita con la dinámica glacial de la zona y, al mismo tiempo, tener la evolución ambiental del sitio en donde se encuentra el Lago Edita.

# Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que me acompañaron en este largo viaje dentro de la universidad.

Familia por estar ahí y quererme y darme apoyo en los buenos días y en los malos.

A todos los pibes por todos esos días de cafetear

A los geopanas por las jipesas de navegados y demás aventuras.

A todos los que me dieron un empujoncito.

Gracias.

# Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción .....	1
1.1. Zona de estudio .....	2
1.2. Objetivos .....	5
1.2.1. Objetivo General.....	5
1.2.2. Objetivos Específicos .....	5
Capítulo 2 : Antecedentes .....	6
2.1. Marco Geológico.....	6
2.2. Marco Geomorfológico .....	10
2.2.1. Morrenas.....	10
2.2.2. Paleolíneas de costa.....	11
2.2.3. Deltas emergidos .....	12
2.2.4. Depósitos glaciolacustres .....	14
2.3. Marco Paleoclimático.....	15

2.3.1. Último Máximo Glacial .....	15
2.3.2. Última Terminación glacial.....	16
<b>Capítulo 3 : Metodología .....</b>	<b>18</b>
3.1. Técnica de extracción de testigo.....	18
3.2. Mapeo geomorfológico .....	18
3.2.1. Deltas.....	19
3.2.2. Líneas de costa .....	20
3.3. Tomografía computarizada del testigo PC0902CT9.....	21
3.4. Fluorescencia de Rayos X .....	23
3.5. Granulometría.....	27
<b>Capítulo 4 : Resultados.....</b>	<b>29</b>
4.1. Mapeo Geomorfológico .....	29
4.2. Estratigrafía y sedimentología.....	30
4.2.1. Estratigrafía .....	31

4.2.2. Tomografía .....	33
4.2.3. Sedimentología .....	35
4.3. Química Inorgánica.....	38
Capítulo 5 : Discusión.....	42
5.1. Geomorfología y evolución del sistema de lagos .....	42
5.2. Reconstrucción ambiental Lago Edita.....	43
Capítulo 6 : Conclusión .....	48
Bibliografía .....	50

# Capítulo 1: Introducción

Durante el Pleistoceno tardío ocurrió la llamada Última Transición Glacial-Interglaciaria (Last Glacial-Interglacial Transition, LGIT), corresponde al periodo de transición entre el último periodo glaciario y el actual periodo interglaciario (Hoek, 2008). Esta transición glaciario-interglaciaria es asociada a grandes cambios climáticos a escala global, caracterizándose por retrocesos glaciares, lo que implica una mayor disponibilidad de agua y por lo tanto un aumento significativo del nivel del agua (Ruddiman, 2001). Estudiar y comprender estos procesos en periodos de cambios climáticos es fundamental, sobre todo teniendo en cuenta las condiciones presentes y futuras, ya que con esta información se puede tener una idea y tener en cuenta las consecuencias de cambios del clima ocurridos anteriormente y que podrían ocurrir en un futuro.

A gran escala se tienen evidencias y morfologías que muestran la evolución de los avances y retrocesos de los lóbulos glaciares. La temporalidad de estos eventos no es clara, dejando temas propuestos para investigaciones posteriores y a menor escala, como este trabajo. Información relevante falta por conocer a mayor profundidad como, la disposición de los hielos en este periodo de tiempo, el rebote isostático causado luego del retroceso de estos hielos y como esto afectó a los lagos de la zona, (General Carrera y Cochrane) y el área de estudio. Lo que se conoce como el Manto de Hielo Patagónico (Patagonian Ice Sheet) fue el principal agente erosivo por un buen periodo de tiempo. Su retroceso causó muchos cambios morfológicos e hidrológicos, cambiando la dirección de drenaje de los lagos pro-glaciario que los acompañaban (Thorndycraft et al., 2019, Vásquez et al., 2022), drenando inicialmente al Atlántico para finalizar drenando en el Pacífico, por el río Baker.

Con el objetivo de contribuir a esta discusión, se estudiarán las facies lacustres de un testigo sedimentario extraído del Lago Edita (47.1444 S, -72.4297 E) se realizaron distintos tipos de pruebas algunas no destructivas tal como lo es la tomografía en 3D, en donde se pueden reconocer diferentes estructuras y elementos que se encuentran en el interior del testigo junto con cambios de atenuación interpretados como variaciones de densidad. Y finalmente, las pruebas destructivas fueron realizadas para estudiar la granulometría y geoquímica a fin de tener un entendimiento de los procesos sedimentarios asociados.

Se espera que los resultados de esta investigación entreguen información sobre la dinámica glaciario durante el Pleistoceno tardío en Patagonia norte a partir de los cambios ambientales registrados en el Lago Edita.

## 1.1. Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada en el sur de Chile, en la Región de Aysén, en el valle Chacabuco, entre los lagos General Carrera y Cochrane, como se tiene en la

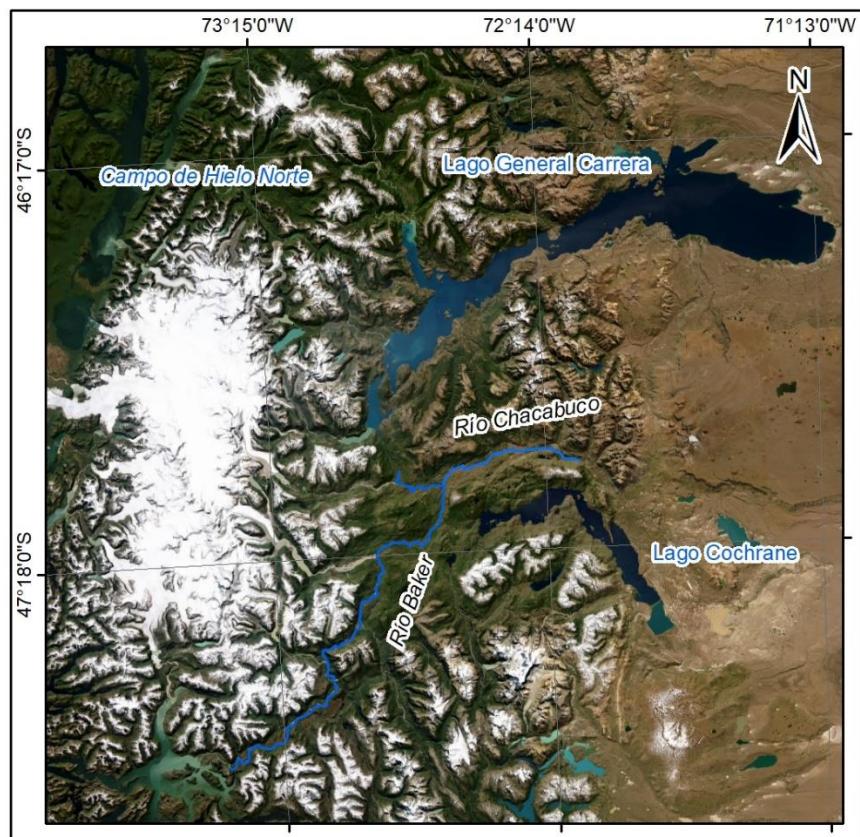


Figura 1.1. Se encuentra a una altitud aproximada de 550 metros sobre el nivel del mar y sus coordenadas son (47.1444 S, -72.4297 E). En el Valle Chacabuco se encuentra el lago Edita Figura 1.2, considerado en estudios anteriores (Henríquez, et al., 2017) como un lago endorreico.



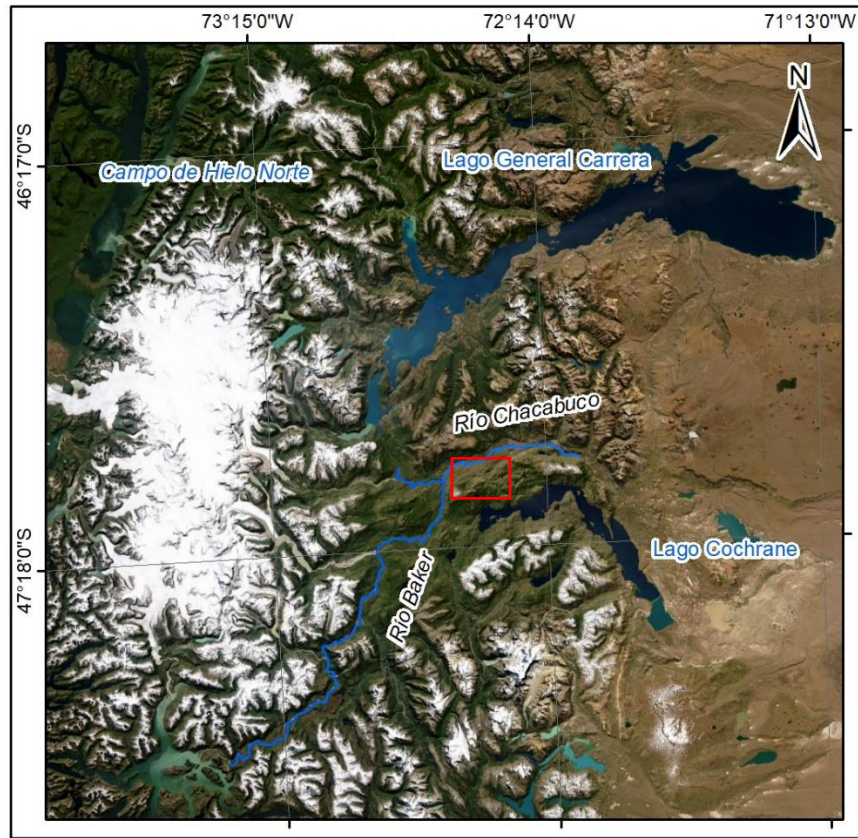


Figura 1.1 Imagen satelital de la zona de estudio, mostrando una visión general del área de estudio (recuadro rojo). Se observan el Lagos General Carrera y el Lago Cochrane. Ríos locales resaltados como líneas azules, río Chacabuco, río Baker y río Cochrane.

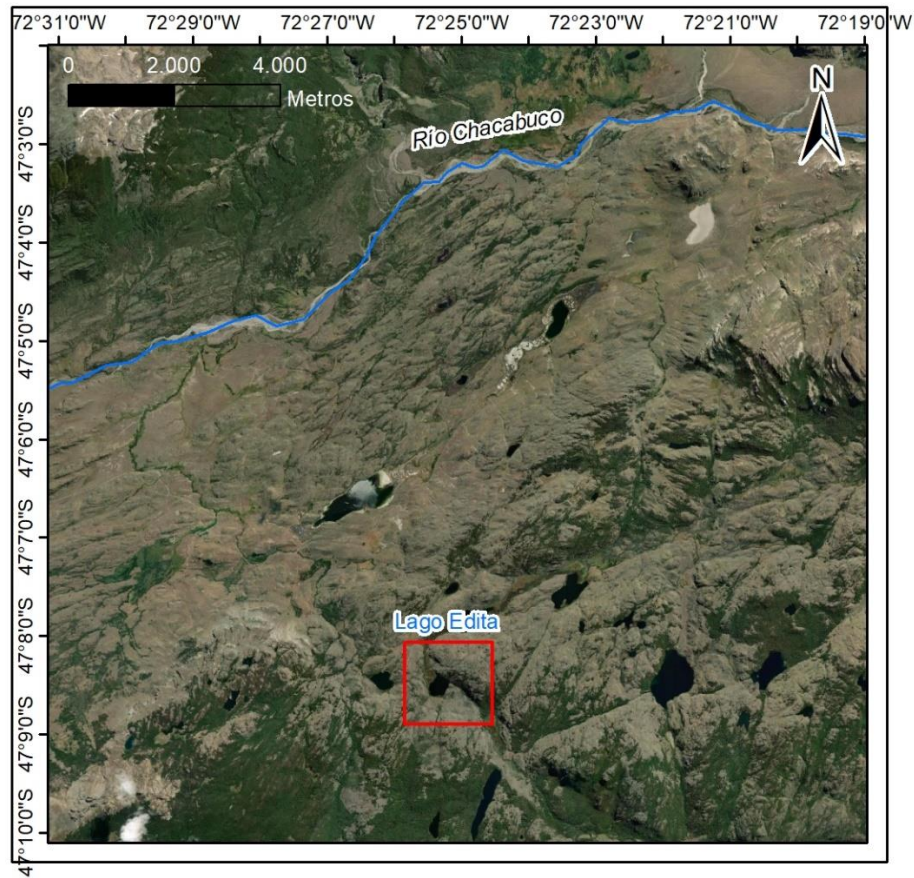


Figura 1.2 Imagen satelital o del Valle Chacabuco, ubicación lago Edita en recuadro rojo.

En el sector se encuentran los Andes Patagónicos, una de las unidades morfológicas más importantes de la región. Esta cadena montañosa se caracteriza por, su contacto directo con el mar formando valles inundados, fiordos y canales. A una latitud similar, pero al oeste, está alojado el Campo de Hielo Norte y desde esa dirección (Oeste-Este) se pueden encontrar morfologías glaciares y peri glaciares, como valles en U, morrenas y estrías. Estas evidencias sugieren que la zona fue moldeada por acción glacial, por avances y retrocesos de grandes masas de hielo dejando como huella grandes lagos alineados E-O como ocurre en el lago General Carrera y en el Cochrane. Trabajos anteriores proponen que este un hielo, por un tiempo, actuó de represa, generando altos niveles de agua (Vásquez et al., 2022). Evidencias de estos niveles superiores se ven en antiguas líneas de costa, deltas emergidos y pequeños lagos a los alrededores y a distintas altitudes.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Reconstruir procesos sedimentarios y ambientales durante el Pleistoceno Tardío-Holoceno, a partir del estudio de un testigo lacustre del Lago Edita y determinar su relación con la dinámica glaciaria en Patagonia Central (47°S) durante ese periodo.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar la sedimentología, estratigrafía y geoquímica de registro de sedimentos lacustres obtenido de Lago Edita, Región de Aysén.
- Interpretar procesos de transporte sedimentario para proponer un modelo ambiental evolutivo.
- Relacionar los resultados obtenidos con la dinámica glaciaria de la zona.

# Capítulo 2: Antecedentes

En esta sección se revisarán conceptos relevantes que están relacionados con el área de estudio y su contexto. Se tiene el marco geológico en donde se describen las litologías relevantes en el marco geomorfológico se describirán geoformas relacionadas con las dinámicas y procesos del ambiente estudiado. Finalmente, un marco paleoclimático en donde se describirán grandes procesos climáticos que tuvieron influencia.

## 2.1. Marco Geológico

El Lago Edita se encuentra sobre el complejo metamórfico Andino Oriental, compuesto por rocas meta-sedimentarias, mármoles y esquistos. También se encuentran distintos tipos de rocas ígneas, como hipabisales, rocas piroclásticas, el batolito patagónico y granodioritas, por mencionar algunas. Entre los depósitos del Holoceno se reconocen depósitos deltaicos, lacustres y glaciares antiguos y elevados. Finalmente, los depósitos actuales junto a los depósitos elevados ayudan a la identificación de variaciones de los niveles de agua para periodos convenientes al estudio. En la Figura 2.1 se muestra un extracto de, la carta geológica de la zona Cochrane-Villa O'Higgins (Minería & de la Cruz, 2004) y de donde también fueron extraídas las descripciones litológicas.

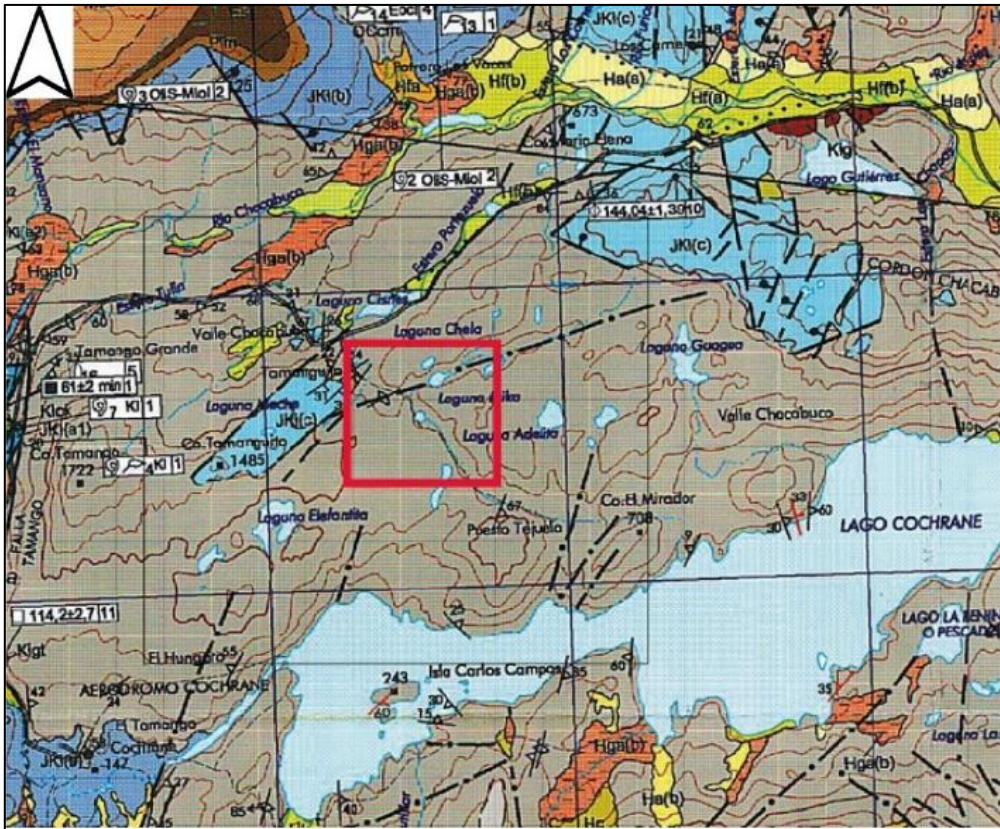
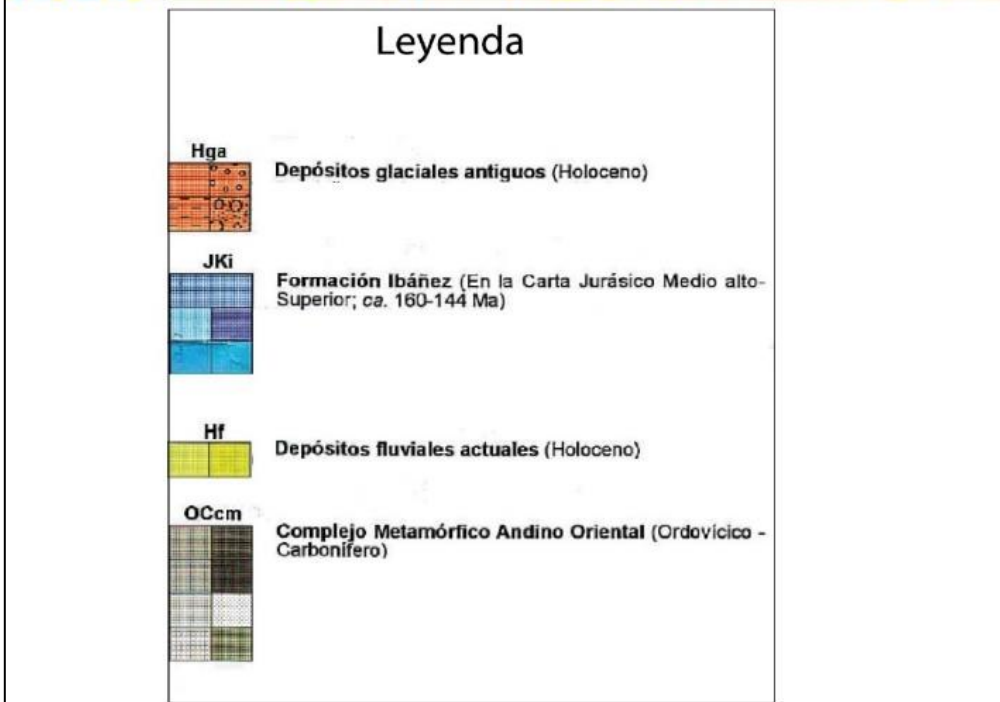


Figura 2.1  
 Extracto de Carta  
 geológica de la  
 zona, comprendida  
 entre Cochran-  
 Villa O'Higgins  
 donde se destaca  
 Lago Edita en un  
 recuadro rojo. Mo-  
 dificado de Minería  
 & de la Cruz  
 (2004).



La geología más abundante en la zona de estudio corresponde a un complejo metamórfico y es descrito a continuación.

### *Complejo Metamórfico Andino Oriental OCcm (Ordovícico - Carbonífero)*

Este se ve representado en color gris en la Figura 2.1, está definido por las rocas metamórficas previas al Jurásico Medio-Superior y que afloran en la región centro oriental de la Cordillera Patagónica.

Su litología consiste en una serie de esquistos y filitas de cuarzo-muscovita y de forma colateral, mármoles y esquistos verdes. De acuerdo al grado de deformación y preservación o destrucción de estructuras sedimentarias del complejo se han podido reconocer tres asociaciones de rocas metamórficas, que no se encuentran cartografiadas en la hoja (Minería & de la Cruz, 2004). La primera asociación y la más predominante está compuesta por rocas metamórficas fuertemente plegadas, se ha postulado que es resultado de varias etapas o de un tectonismo progresivo. Esta deformación destruyó las estructuras sedimentarias originales del protolito, generando esquistos y filitas con niveles de metamorfismo que llegan hasta esquistos verdes. Esta formación se denominó inicialmente por Lagally (1975) como formación lago General Carrera e incluye mármol y esquistos calcáreos(a), metacherts(b) y metabasitas(c). La segunda asociación corresponde a rocas meta-sedimentarias de menor grado metamórfico, teniendo en cuenta que están deformadas, pero se preservan las estructuras sedimentarias reconocibles como turbiditas. Estas rocas están incluidas en la Formación Lago Cochrane de Lagaly (1975). La litología de ellas, se muestran metareniscas cuarcíferas(d) con gradación normal, bases erosivas, flautas, laminación cruzada, estructuras de pérdida de agua y diques sedimentarios. Muy ocasionalmente se identificaron intercalaciones de metaconglomerados(e), clasto y matriz soportado. La fracción clástica está formada principalmente por cuarzo y subordinante feldespato monocristalino y líticos (metacuarcitas, esquistos, fragmentos de rocas volcánicas porfíricas silíceas con fenocristales de cuarzo y granitoides). En sectores se reconocen sucesiones donde alternan metarenitas y metapelitas(f) estratificadas, las metarenitas son de composición cuarcífera y muestran estructuras como; laminación cruzada, pliegues convolutos, ondulitas, ondulitas de crecimiento, trazas de fósiles, y marcas de flauta en la base. Las metapelitas presentan de estructura una fina laminación. Se identificaron de forma local metapelitas(g) con finas laminaciones (menos a 5 cm) de areniscas muy finas.

Las demás unidades no forman parte importantes de la zona de estudio, sin embargo, son útiles para interpretar y comprender la geomorfología y la geoquímica en el marco de este estudio. Sus características se presentan a continuación en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Unidades geológicas relevantes de la hoja Cochrane-Villa O'Higgins.

<u>Unidad y edad</u>	<u>Litología / depósitos</u>	<u>Observaciones</u>
<i>Granodioritas Cerro Cabeza de León Jsgvc (Jurásico Medio)</i>	Se denominó como petrográficamente homogéneo, de grano medio compuesto por granodiorita de anfíboles y biotita. Químicamente estas entran en la clasificación de granitos de arco volcánico clásico.	Aflora en el sector noroccidental de la hoja y al oeste de la zona de estudio entre los ríos Nef y De La Colonia.
<i>Formación Ibáñez JKi (Jurásico Medio alto - Superior)</i>	Su litología es principalmente piroclásticas y lávicas, de composiciones riolíticas, dacíticas y andesíticas subordinadamente, incluyendo la base de brechas sedimentarias, conglomerados y areniscas.	Esta sobre yace discordantemente al Complejo Metamórfico Andino Oriental
<i>Depósitos glaciares antiguos Hga (Holoceno)</i>	Sedimentos de origen glacial, moderadamente consolidados, se reconocen 3 tipos de depósitos, depósitos glaciolacustres, depósitos morrénicos y depósitos glaciares elevados.	Depósitos morrénicos sin estratificación, compuesto por gravas y bloques, una matriz principalmente arcillosa con fracciones de arena. Morrenas laterales, ubicadas entre los 100 y 400 metros de altura. Depósitos glaciolacustres, constituidos por secuencias arcillosas de varvas con dropstones, que intercala localmente con depósitos fluvio-glaciares, compuestos por arena, limo y grava presentando estratificación planar y cruzada. Estos depósitos exhiben una morfología aterrazada Finalmente, depósitos glaciares elevados ubicados entre la cota 500 y la cota 1000.

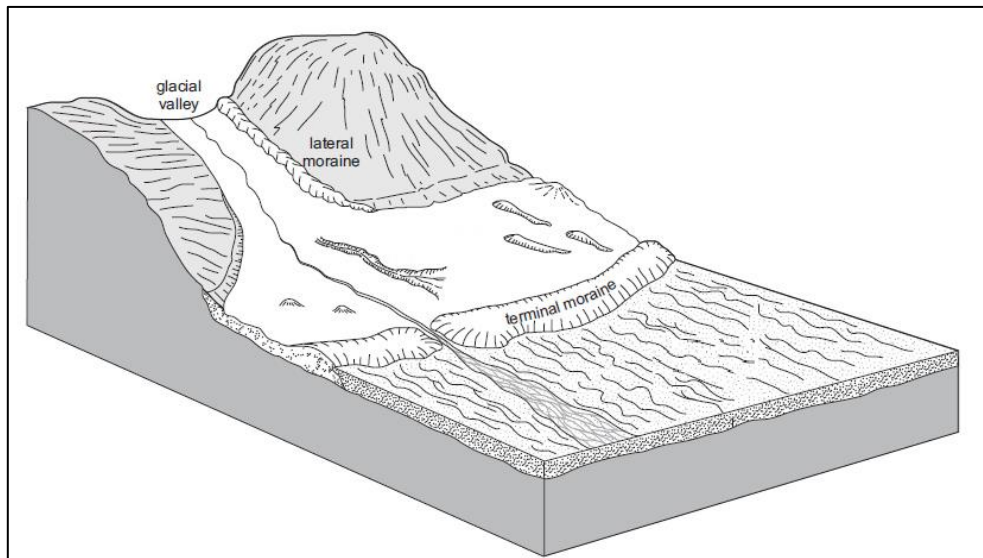
## 2.2. Marco Geomorfológico

La geomorfología tiene como objetivo el estudio de las formas de la superficie terrestre, su caracterización, la determinación de que agentes y procesos están involucrados en su génesis y finalmente, su comportamiento actual. En este caso se estudian morfologías glaciares, peri glaciares, lacustres, y además de los procesos fluviales que también están presentes en los desagües de los cuerpos lacustres. Se incluyen las descripciones morfológicas y sedimentológicas de la variedad de morfologías que se reconocen en la zona, las cuales se mencionan a continuación

### 2.2.1. Morrenas

Corresponde a un montículo con filo o cresta, suelen ser alargadas y relativamente angostas. Clasificadas según su posición en un glaciar es posible determinar: morrenas laterales y frontales además de morrenas intermedias cuando dos morrenas laterales se unen. Las morrenas que marcan la máxima extensión de un glaciar son conocidas como morrenas terminales (Figura 2.2). En el retroceso del hielo se pueden formar distintos sistemas de morrenas, con posiciones gradacionales, estas son conocidas como morrenas recensionales (Goudie, 2006). Usualmente están compuestas de till que es un sedimento no consolidado, de mala selección, sin estratificación y con clastos angulosos, estos son el resultado de la meteorización mecánica en ambientes fríos. Dentro de los depósitos de till se encuentra un sedimento conocido como harina de roca, que está compuesta por partículas tamaño fino a muy fino que sufrieron abrasión glaciar junto con los fragmentos más grandes mencionados. La harina de roca, por ser de tamaño fino, sin composición de arcilla (como producto de meteorización química) no posee las propiedades de las arcillas de floculación, lo que permite mantenerse en suspensión por mayor tiempo. Esto también provoca la coloración azul verdoso en las lagunas pro-glaciar o que reciben descargas hídricas de glaciares (Nichols, 2009).





*Figura 2.2. Posiciones de las morrenas en un valle glaciar, extraído y modificado de (Nichols, 2009).*

### 2.2.2. Paleolíneas de costa

Se identifican como terrazas angostas continuas y de forma curva, con una pendiente muy tenue hacia el lago, comúnmente alineadas paralelamente a la costa actual del lago. Se forman cuando se mantiene estable el nivel del lago por un tiempo prolongado, debido a esto suelen ser usadas como indicadores de paleo niveles lacustres. Se pueden encontrar como líneas erosivas marcando escarpes creados por el oleaje o deposicionales como en forma de playa, con los sedimentos disponibles (Benn & Evans, 2014). La Figura 2.3 muestra estas morfologías.

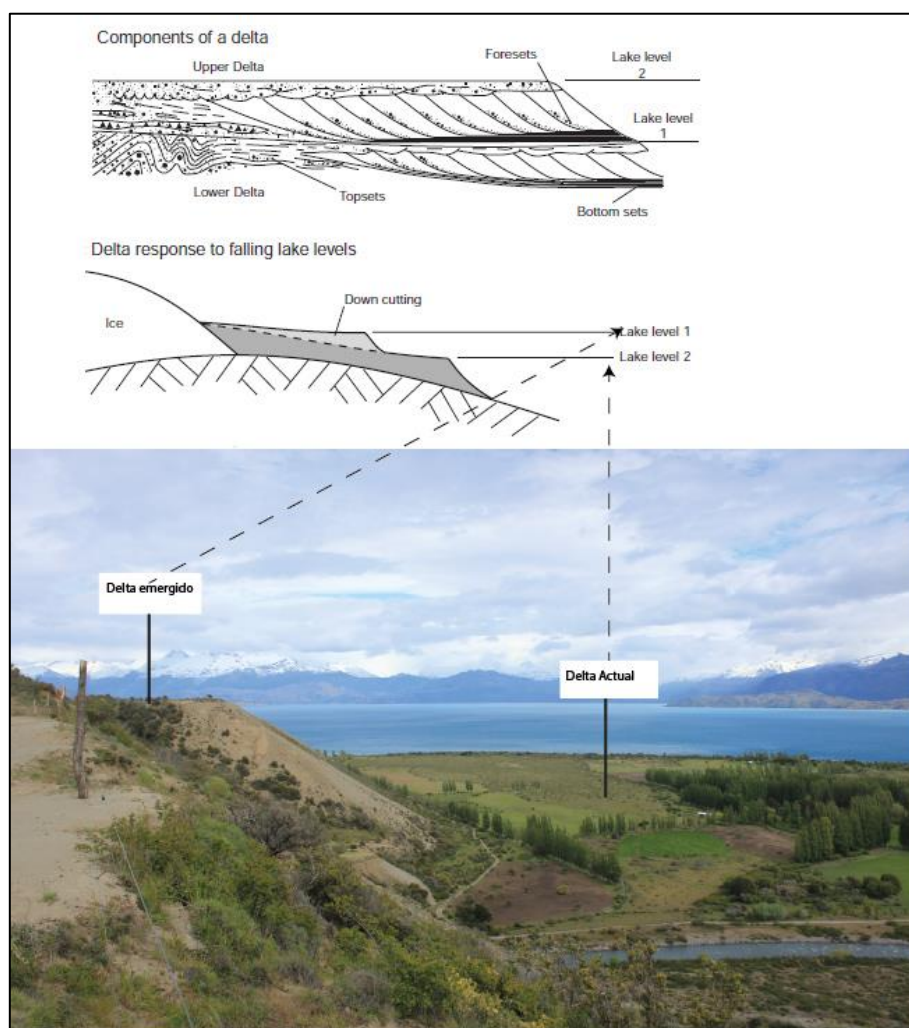


Figura 2.3 Paleolíneas (destacadas en blanco) de costa ubicadas en la zona de estudio.

### 2.2.3. Deltas emergidos

Los deltas corresponden a una superficie homogénea, con textura y color diferente a los terrenos adyacentes. Estos poseen un quiebre de pendiente a lo largo del antiguo frente deltaico y se aproxima al antiguo nivel del lago (Bendle et al., 2017). Estos deltas se identifican como deltas de tipo Gilbert, estos son deltas progradantes de grano grueso que se producen ligados a la entrada de corrientes fluviales (Arche, 2010). Ubicados en la desembocadura de un río, están ubicados los deltas, morfologías de transición entre fluvial y lacustre en este caso. En el caso de los deltas emergidos estos se pueden reconocer río arriba desde el delta anterior. Los deltas de Gilbert son los más abundantes en la zona de estudio y en los lagos pro-glaciar, estos se forman en aguas profundas y debido a mucha carga sedimentaria y tienen una forma particular y distintiva (Goudie, 2006) (Figura 2.4). La parte superior o el techo está definido por el topset, compuesto por capas de poca inclinación, en este lugar se pueden desarrollar pantanos y depósitos de inundación, unión de canales rupturas de levées entre (Arche, 2010; Nichols, 2009) Su forma consiste en una parte central, que ocupa la mayor parte del volumen del cuerpo, conocida como foreset, son capas de alta pendiente ( $30^\circ$  aproximadamente) con inclinación hacia el cuerpo de agua. Estos suelen estar

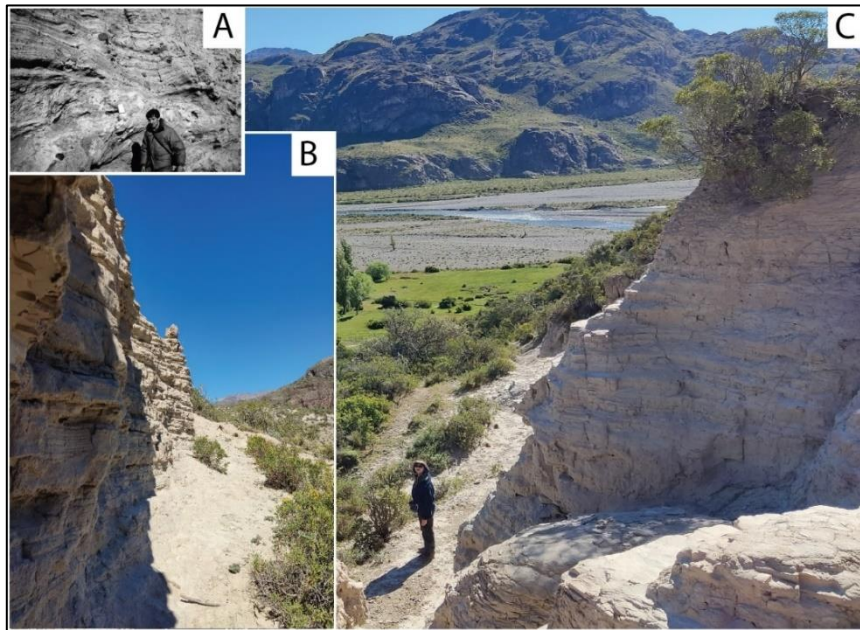
compuestos por sedimentos desde el tamaño arena hasta el tamaño grava que pueden ser masivas o con gradación, con estructuras de flujo como ondulitas y deformación sin-sedimentaria como slumps. En la parte sumergida se encuentra la base del cuerpo deltaico llamado bottom set, corresponden a capas de material fino con poca pendiente depositadas por corrientes de turbidez y por decantación (Goudie, 2006). En Espíndola (2022) y Vásquez et al. (2022) se trabaja en la zona de estudio y con énfasis en estas morfologías, para el estudio de los niveles de inundación del Lago General Carrera.



*Figura 2.4 Comparación de esquema, extraída de Bennett & Glasser, (2011) y fotografía de la zona de estudio en el Lago General Carrera, (créditos fotografía: Joaquina Espíndola).*

## 2.2.4. Depósitos glaciolacustres

Estos son acumulaciones de sedimentos de grano fino y suelen encontrarse en los antiguos bordes de glaciares, o en los bordes de los valles. Estos depósitos tienen como característica principal, que su depositación de capas intercaladas de limo color claro y arcillas más oscuras, por lo cual comúnmente se les llama ritmitas. Las diferencias en los sedimentos pueden representar estacionalidad, siendo limos más claros pueden representar flujos de primavera o tormentas y las capas más oscuras de arcillas contienen material orgánico que puede representar la depositación en época de invierno. El contacto entre estas capas suele ser bien definido y/o gradacional. La periodicidad de estas capas es variable puede ser tanto en periodos cortos con laminaciones internas, mostrando tiempos cortos (horas o días) o bien de manera anual, en cuyo caso reciben el nombre de varvas (Goudie, 2006). En el área también se encuentran depósitos de origen glaciolacustres elevados del mismo modo que los deltas mencionados anteriormente, en Figura 2.5 se observan ejemplos. Imagen A muestra un ejemplo de depósitos glaciolacustres de Bennett & Glasser (2011), comparados con la Imagen B, mostrando similitudes como secuencias laminadas de grano fino, sin embargo, Imagen B carece de clastos en la matriz. La Imagen C muestra el depósito, con una escala de 1.7 metros, en el nivel de un delta abandonado.



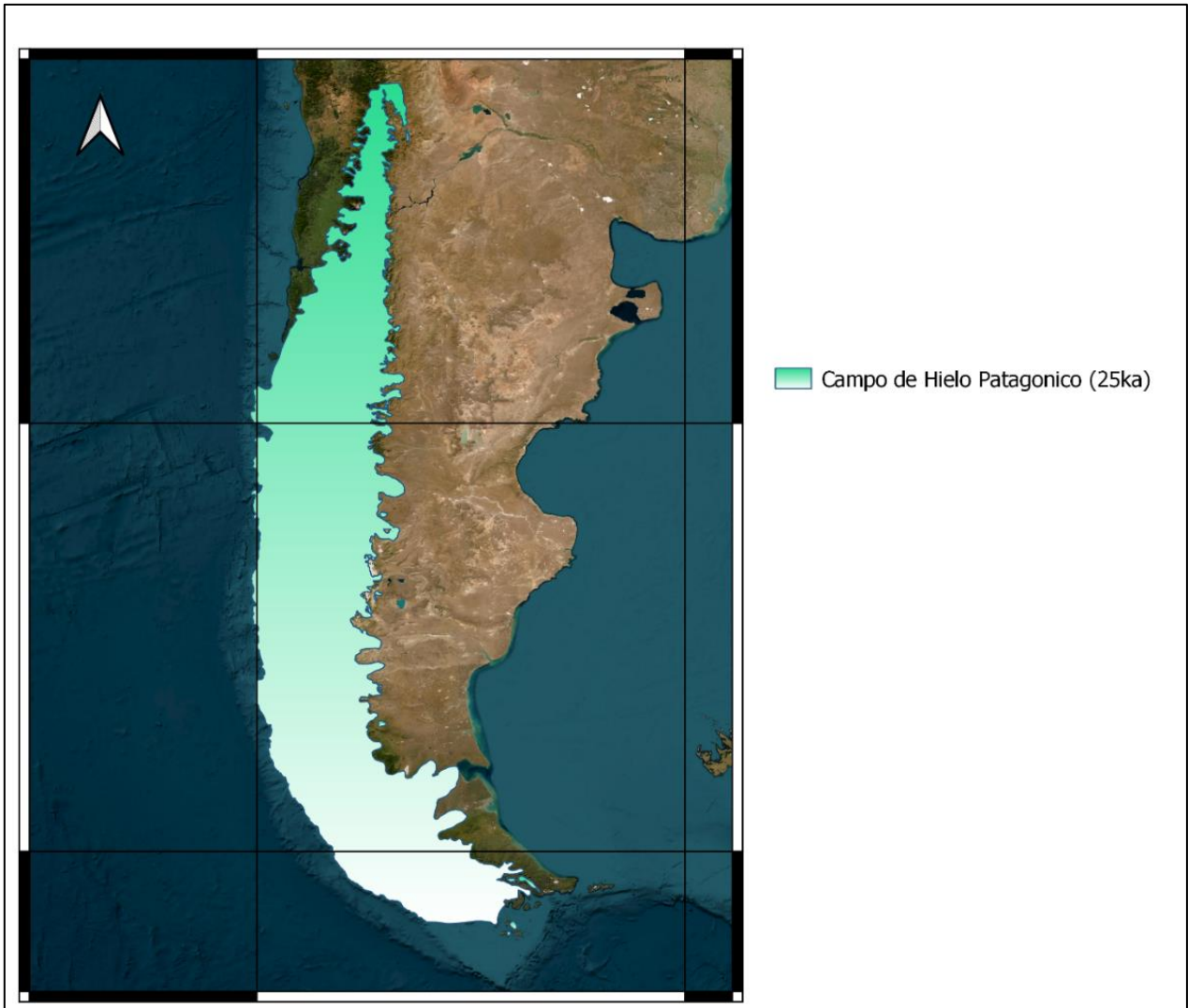
*Figura 2.5 De A Imagen de depósitos glaciolacustres, extraída de Bennett & Glasser (2011). Imagen B y C secuencia de depósitos, imagen C con una escala de aproximadamente 1.7 metros*

## 2.3. Marco Paleoclimático.

A continuación, se describen los principales eventos climáticos ocurridos durante el Pleistoceno Tardío y que afectaron al clima de forma global, dejando grandes evidencias en la zona de estudio. Estos eventos climáticos están relacionados con la dinámica Glaciar, ya sea dando las condiciones para un avance o un cambio generando retrocesos. Finalmente, el cambio de condiciones ambientales se ve reflejado en cambios en los procesos y los agentes de estos.

### 2.3.1. Último Máximo Glacial

Periodo cuando las masas de hielo, glaciares y casquetes, alcanzaron su extensión máxima entre 26 y 19 ka (Clark et al., 2009). Este periodo coincide con el momento en el que el mar alcanzó su punto más bajo, generando esta especie de equilibrio con la criósfera y el clima (Clark et al., 2009). Las evidencias de este fenómeno se encuentran en las morrenas terminales que grandes lóbulos glaciares dejaron en su máxima extensión, antes de retroceder. El Manto de Hielo Patagónico (PIS, por sus siglas en inglés) (Figura 2.6) corresponde a la masa de hielo que estaba formada por el Campo de Hielo Norte y Campo de Hielo Sur y una gran extensión, teniendo grandes alcances dirección Norte y en dirección a la zona de estudio, en donde se registra uno de los avances más al Este registrados en los lóbulos del Lago General Carrera y Lago Cochrane. Estudios muestran el alcance que tuvieron estos lóbulos cuya procedencia era el Campo de Hielo Norte, que llegaron hasta las reconocidas morrenas terminales Fénix (Lago Cochrane/Pueyrredón) y Río Blanco (Lago General Carrera/Buenos Aires) (Douglas et al., 2006; Hein et al., 2010; Kaplan et al., 2011).

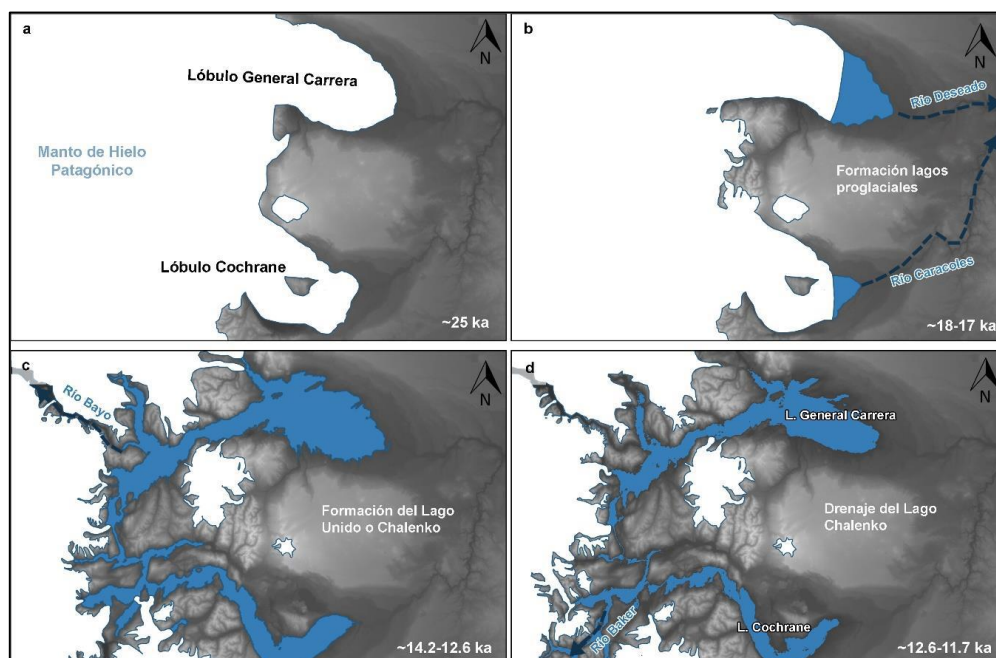


*Figura 2.6 Figura que ilustra el PIS, extraída de la reconstrucción de Patice (Davies et al., 2020).*

### 2.3.2. Última Terminación glacial

Corresponde al periodo de transición más reciente entre una glaciación y un periodo interglaciar, se estudia para comprender el funcionamiento del sistema climático durante las últimas glaciaciones. Esta etapa comienza al término del Último Máximo Glacial aproximadamente entre 18-11 ka (Vásquez et al. 2022). Caracterizada por un aumento paulatino en la temperatura y, en

consecuencia, un retroceso en los glaciares. Como efecto directo y progresivo se tienen registros de un aumento en el nivel del mar de alrededor de 100 metros (Denton et al., 2010). En el área de estudio, se re estudios de polen y vegetación (Henríquez, al., 2017; Moreno et al., 2018) proponen condiciones más cálidas a través del reconocimiento de partículas de polen de diferentes especies de vegetación en forma de arbustos, árboles y helechos. Mostrando las migraciones y desapariciones de especies más resistentes al frío y colonización por vegetación de clima más templado. Registrando retrocesos glaciares del PIS, en especial los lóbulos del Lago General Carrera y Lago Cochrane. El proceso de retirada del hielo genera una acumulación de agua, la que suele formar un lago proglacial. Estos lagos son susceptibles a las condiciones del glaciar, la posición en la que se encuentra puede represar el lago y retrocesos pueden causar nuevas aperturas en el sistema de drenaje. Esto lleva junto a la propuesta de un sistema de lagos conectados y represados, compuesto por el Lago General Carrera, Lago Cochrane y el Valle Chacabuco, en su máxima inundación (Vásquez 2022). En la Figura 2.7 se muestran las etapas evolutivas de los lagos y su comportamiento con respecto a la posición del hielo (Vásquez 2022). Finalmente, en este periodo, la temperatura no aumentó sostenidamente, sino que también presenta lapsos en donde la temperatura disminuye y pequeños avances glaciares se registraron.



*Figura 2.7 Evolución del retroceso glaciar en la zona de estudio, lagos represados por hielo y cambios de drenaje, extraída de (Vásquez A., 2022).*

# Capítulo 3: Metodología

## 3.1. Técnica de extracción de testigo.

Testigos superpuestos y continuos fueron extraídos desde la parte de mayor profundidad del Lago Edita (8 metros) desde una plataforma anclada de perforación, con un tubo de revestimiento de 10 cm de radio. Utilizando una perforadora de pistón de interfaz sedimento-agua, de 7,5 cm de diámetro. De estos testigos continuos de código PC0902 se extrajeron tres series paralelas denominadas A, B y C. Y finalmente se le asignó el valor de la profundidad dentro del código para denotar la fecha de la extracción y que serie se está estudiando. En este caso se estudió el segmento PC0902CT9.

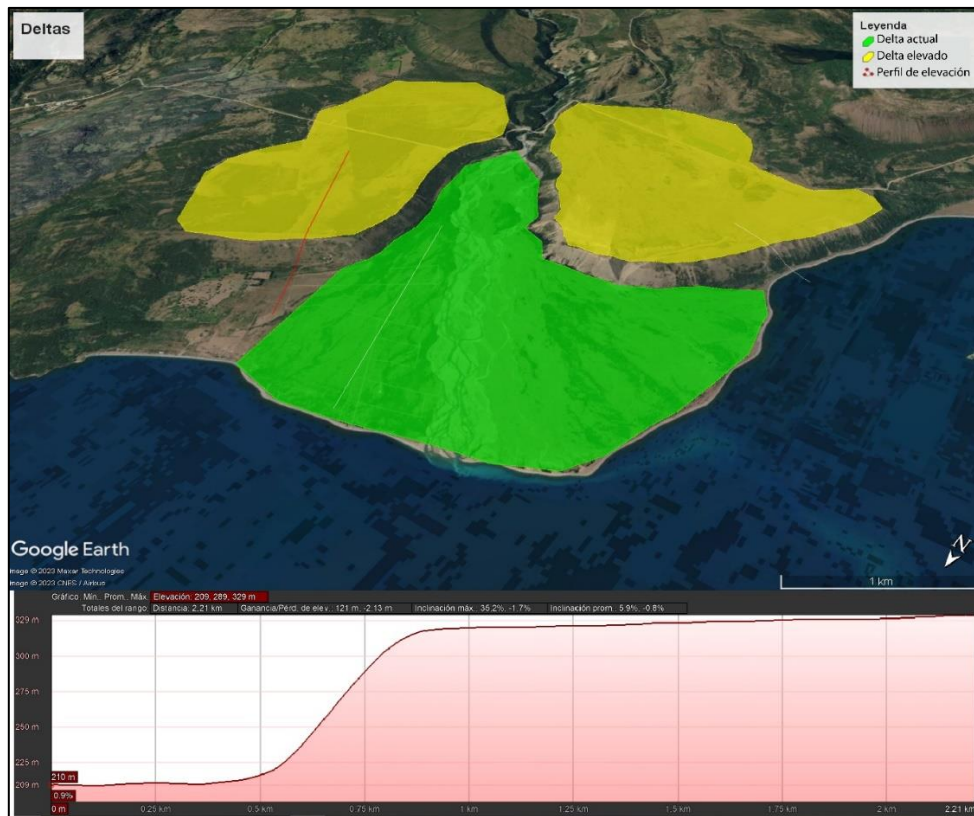
## 3.2. Mapeo geomorfológico

Como trabajo previo se realizó un mapeo geomorfológico en Lago General Carrera. Éste se llevó a cabo mediante la interpretación de imágenes satelitales con el uso del software Google Earth y Qgis. Se realizó el reconocimiento e identificación de deltas y líneas de costa haciendo barridos visuales en la costa norte y en la costa sur.



### 3.2.1. Deltas

Poseen geometría con forma de abanico y, en especial los deltas de tipo Gilbert, poseen la característica especial de presentar un quiebre de pendiente entre el topset y el foreset, que es muy pronunciado (hasta  $50^\circ$ ). Este cambio de pendiente es debido al cambio de condiciones aéreas/subacuáticas a totalmente subacuáticas, siendo un factor de reconocimiento de distintos niveles del agua en deltas abandonados. En la Figura 3.1 se observan imágenes satelitales ejemplificando el reconocimiento de estas morfologías, en donde se reconocen las características y el perfil de elevación de un frente de delta emergido.



*Figura 3.1 Ejemplo de mapeo e identificación de morfologías deltaicas, mostrando el nivel actual (verde), el nivel elevado (amarillo) y transecta (rojo). Se observa como el delta abandonado es disectado por la acción fluvial.*

### 3.2.2. Líneas de costa

Esta morfología consiste en antiguos contactos entre la superficie del agua y la superficie de la costa del lago. Estos tramos muestran lapsos de antiguos niveles de agua, sin embargo, es necesaria una estabilidad mínima del nivel de agua, como se observa en la Figura 3.2. Para su identificación se consideran las siguientes características: pequeñas terrazas curvilíneas con pendiente relativamente estable, como se puede ver en la Figura 3.3. La forma es dependiente de la topografía de la zona. Estas líneas pueden extenderse varios kilómetros y usualmente alineadas y paralelas a la línea del lago actual (Bendle et al., 2017). La principal particularidad de estas geoformas es que a lo largo de la línea no se encuentran cambios de nivel considerables, sino más bien marca una tendencia a horizontalidad Figura 3.3.



Figura 3.2 Imagen satelital resaltando paleolíneas de costa (rojo) siendo paralelas y curvas.



Figura 3.3 Perfil de elevación de línea de costa superior (Figura 3.2), mostrando una leve variación vertical ( $< 3\text{m}$ ) dentro de la misma paleolínea.

### 3.3. Tomografía computarizada del testigo PC0902CT9

Se realizó una tomografía computarizada del registro sedimentarios del segmento PC0902CT9, en el Hospital Clínico de la Universidad de Chile Figura 3.4. Esto permite obtener una imagen en 3 dimensiones el de la estructura interna del testigo. Esta técnica no destructiva permite estimar variaciones en el parámetro de atenuación, el cual puede ser interpretado como respuesta a cambios en la densidad de los sedimentos. Los resultados de este análisis se muestran una escala de grises Figura 3.5.



*Figura 3.4. Imagen de maquina utilizada en la tomografía de los testigos, SOMATOM Definition Edge de Siemens, extraído y modificado de Vásquez A, (2022).*

La atenuación es la disminución de energía que se produce en una radiación al interactuar un medio que la atraviesa. Lo que se mide en la tomografía computarizada es el coeficiente de atenuación lineal  $\mu$ , que se describe en la ley de atenuación.

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

En donde  $I_0$  es la intensidad de entrada de los rayos X,  $I$  corresponde a la intensidad de salida y  $d$  es el espesor del objeto irradiado.

Para esto se asumen rayos X estrechos y de radiación monocromática. Esto se desarrolla dentro de una cavidad cilíndrica (Figura 3.4) en la que existen receptores y los rayos X se irradian de forma rotacional, los detectores captan los rayos atenuados. Los receptores computan la información, analizando volumen y densidad promedio para luego expresarlo en Unidades Hounsfield (HU para Hounsfield Units). Como parte de esta escala se tiene para el valor 0 al valor de la densidad del agua destilada, y para el aire se tendrá un valor de -1000 (Renter, 1989).

Se tiene la siguiente ecuación:

$$\beta H = \left( \frac{\mu\rho - \mu_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} \right) * 1000$$

En donde  $\beta$  es una constante del aparato,  $H$  es la densidad radiológica de Hounsfield,  $\mu$  es el valor de la atenuación por unidad de masa del material ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ),  $\rho$  la densidad gravimétrica y  $\mu_{H_2O}$  el valor de atenuación del agua. Se debe tener en consideración que la atenuación de rayos X es en función de la energía de los rayos, de la densidad y del número atómico del material en estudio (Cnudde et al., 2006).

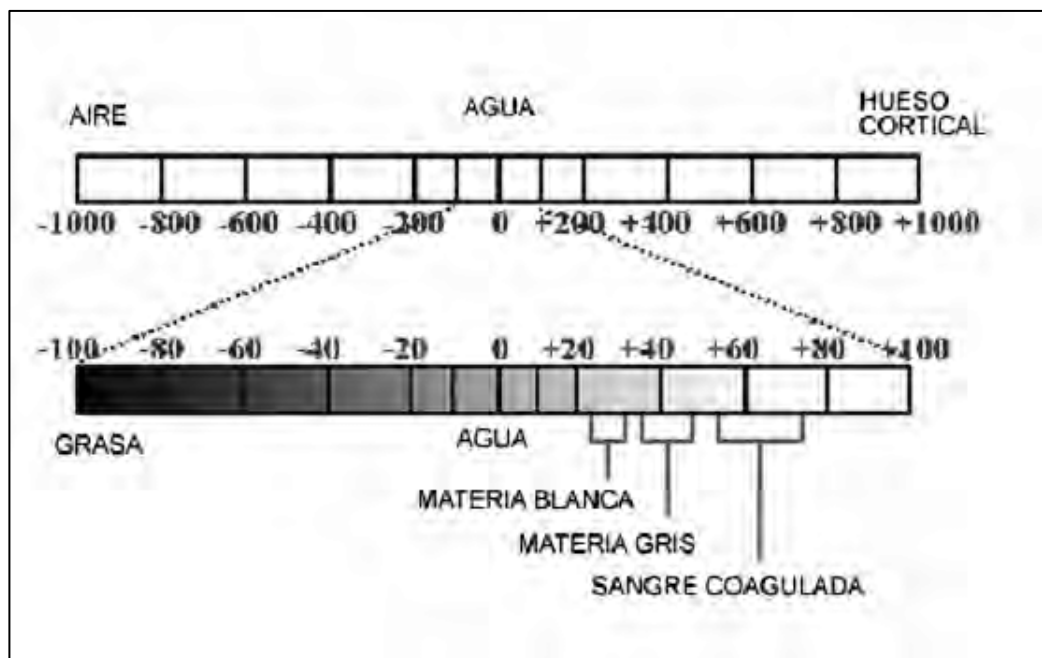


Figura 3.5 Escala Hounsfield y escala de grises en una tomografía computarizada (Aguinaga et al., 2006).

### 3.4. Fluorescencia de Rayos X

Previo a efectuar Fluorescencia de rayos X se realizó una preparación de muestras, se realizó de igual manera para la granulometría, sin embargo, se diferencian en su parte final del proceso. El estudio fue realizado en el Laboratorio de Espectrometría y Fluorescencia de Rayos X (EDX-XRF) del Departamento de Geología, Universidad de Chile.

En primer lugar, se seleccionaron los principales puntos de interés del testigo completo. Se extrajeron 3 cc por punto de muestreo como se puede observar en Figura 3.6 y se etiquetaron según el centímetro en dónde se encontraba. Estos puntos fueron verificados en un análisis visual, en donde se identificaron cambios litológicos y diferentes estructuras. Las muestras seleccionadas y extraídas se trabajan con la metodología Vaasma, (2008) que consiste en la preparación de muestras de sedimentos lacustres para la eliminación de partículas no líticas, lo que se describe a continuación:

Su objetivo es la eliminación de carbonatos, sílice biogénica y materia orgánica, que pueden alterar los resultados, detectando estas materias además del material lítico en estudio. Consiste en 3 pasos, en los cuales están involucrados reactivos para cada uno de los componentes mencionados. Al estar trabajando muestras arcillosas se le añade anticoagulante antes de cada reactivo. Las muestras una vez con el reactivo, se calientan en horno a baño María a 80 °C un tiempo definido dependiendo de la mezcla realizada. Una vez terminado su tiempo en el horno se deja decantar por la noche, para luego realizar una separación del sedimento, a pulso en primera instancia y posterior con agua destilada y centrifugación (3 ciclos) para una separación total. Por último, con las muestras listas se debe realizar un ciclo de secado en el mismo horno, este consiste en 5 días a 30°C para el secado final de las muestras y desde este punto es donde difiere la preparación de fluorescencia y granulometría.

*Tabla 3.1 Orden, materiales y sus reactivos y tiempos de Horno.*

<i>Etapa</i>	<i>Material Destruído</i>	<i>Reactivo</i>	<i>Tiempo Horno Baño María</i>
Primera	Carbonatos	HCl (Ácido Clorhídrico)	5 horas
Segunda	Restos orgánicos	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Peróxido de Hidrogeno)	2 horas
Tercera	Silicio orgánico	KOH (Hidróxido de Potasio)	1 hora y media

Para la fluorescencia de rayos X se necesita la muestra pulverizada en un mortero hasta que tenga tamaño para el tamiz número 200, que es el equivalente a 75 micras o 0,075 milímetros, quedando lista la preparación de la muestra.

El resultado esperado de tipo “señal” de un elemento en particular, contrastándolo con la profundidad con esto para comparar y poder identificar patrones y/o tendencias en éstos de forma cualitativa. En el análisis solo se consideraron los elementos químicos que entregaban información interpretable en función de cambios ambientales según lo visto en Croudace & Rothwell (2015).

Se consideraron elementos como Fe (hierro), Mn (manganeso), K (potasio), Ti (titanio), Ca (calcio), Sr (estroncio), Si (silicio), Al (aluminio) y Rb (rubidio). Estos elementos pueden entregar información sobre procesos ambientales, sin embargo, por si solos pueden llevar a interpretaciones contradictorias. Para mitigar este efecto se realizan razones de elementos. Usualmente, se normaliza con un elemento que se tiene conocimiento de ser estable en la corteza, como el titanio. El resultado muestra el balance entre los elementos y del mismo modo los elementos que están involucrados. Las razones que se utilizaron y sus interpretaciones básicas son:

Tabla 3.2 Razones Elementales usadas y sus implicancias ambientales.

<i>Razón Elemental</i>	<i>Implicancias Paleoambientales</i>	<i>Referencias:</i>
Si/Ti y Sr/Ti	Se estudiaron depósitos de varvas para diferenciar tamaños de grano entre arenas y limos y establecer una proximidad al glaciar.	(Croudace & Rothwell, 2015; Shala et al., 2014)
Mn/Ti	Vinculada con la oxigenación de la columna de agua del lago. Valores altos sugieren ambiente oxidante. Normalización de Mn con Ti (Ti usualmente tiene valores estables en la corteza) vinculado con la oxigenación debido a la interacción que tiene el Oxígeno con el Manganeseo y el resultado es precipitado en forma de óxido de manganeseo y detectando señales de Mn.	(Croudace & Rothwell, 2015; A. Moreno et al., 2007)
Fe/Mn	Valores altos y/o crecientes sugieren ambientes reductores, indicando un mayor contenido de Fe y/o menor contenido de Mg.	(Croudace & Rothwell, 2015; Haberzettl et al., 2007; Unkel et al., 2008, 2010)
Rb/Sr	Valores altos sugieren un incremento en la erosión química, lo que se puede interpretar como condiciones ambientales más húmedas y/o frías. Mientras que los valores bajos sugieren condiciones más secas y/o cálidas.	(Croudace & Rothwell, 2015; Fernández et al., 2013)



## 3.5. Granulometría

En primera instancia se seleccionaron los principales puntos de interés, del testigo completo se extrajeron 3 cc por punto (Figura 3.6) y se etiquetaron según el centímetro en donde se encuentra. Estos puntos se verificaron después de un análisis visual en donde se identificaron cambios litológicos y diferentes estructuras de interés.



*Figura 3.6 Extracción de muestras para granulometría y FRX, imagen extraída y modificada de (Vásquez, 2022).*

El proceso de preparación es el método de Vaasma (2008) cuyos detalles fueron explicados en la sección anterior. Dentro de esta preparación, se degradaron las muestras a través de las reacciones químicas y finalmente perdiendo volumen total de muestras. Se priorizó la geoquímica dejando los análisis granulométricos desde el centímetro 36 en adelante.

Primero, cada muestra se debe pasar por el tamiz número 18 (equivalente a un milímetro para estar en condiciones óptimas para el granulómetro).



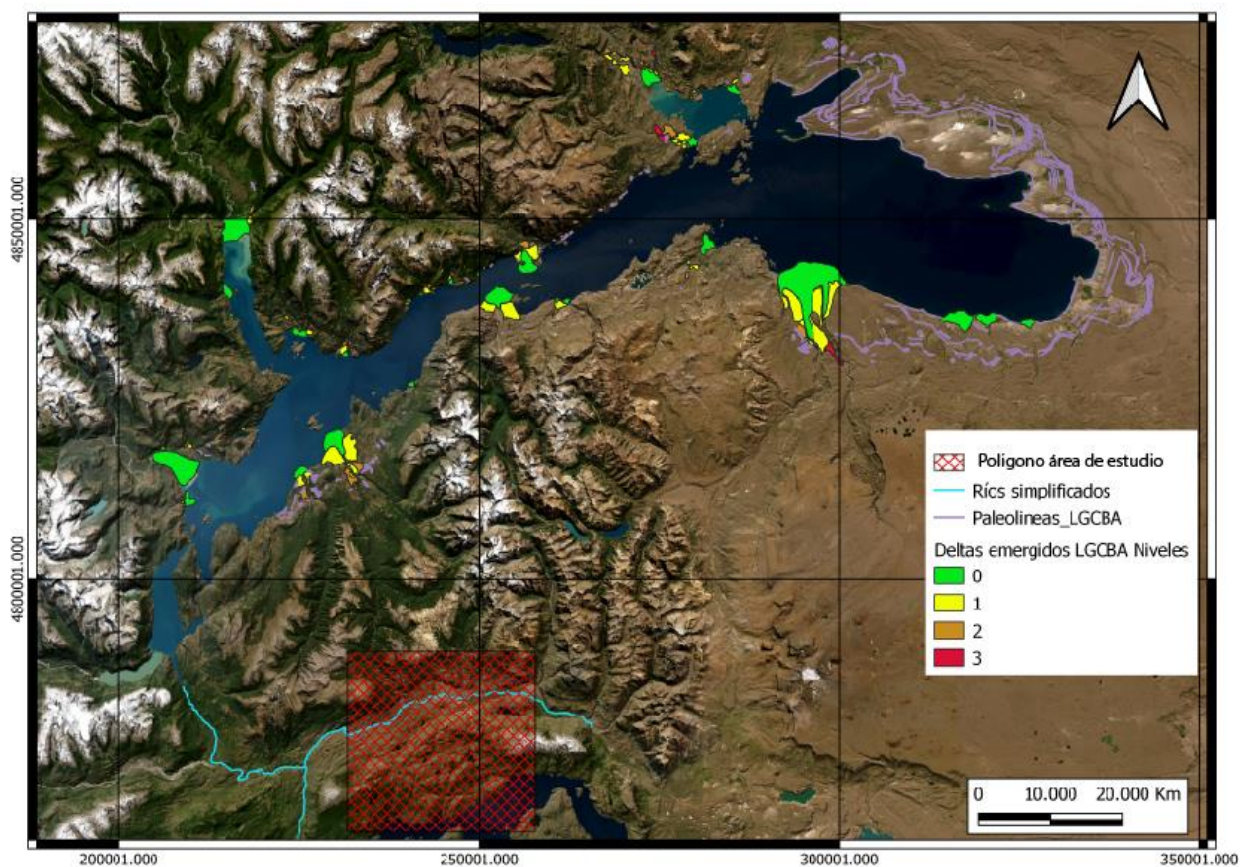
*Figura 3.7 Instrumento utilizado en la granulometría, extraído de Malvern Panalytical y se encuentra en el laboratorio de sedimentología en el departamento de geología de la Universidad de Chile.*

El instrumento usado es el Mastersizer 2000 de Malvern como se muestra en Figura 3.7, disponible en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología Universidad de Chile. Se realizó un escaneo en medio líquido (agua). Dentro del aparato se tiene una celda interna, por donde el agua mezclada con el sedimento fluye a través, al mismo tiempo que un rayo láser incide esta celda haciendo que las diferentes partículas difracten el láser. Luego los receptores que captan el ángulo de desviación para obtener los distintos tamaños. Se realizan varias iteraciones (para este caso tres) para luego entregar datos, curvas y promedios de datos y curvas. Con estos resultados se procedió a trabajar con el software Gradistat de Blott (2000) para el manejo posterior de los resultados obtenidos en Excel, generando diagramas de composición y de granulometría promedio de los sectores identificados.

# Capítulo 4: Resultados

## 4.1. Mapeo Geomorfológico

Se realizó un mapeo de geomorfología en el Lago General Carrera en donde se reconocieron principalmente de paleolíneas de costa y deltas emergidos. En la Figura 4.1 se destacan las morfologías estudiadas y la zona de estudio.



*Figura 4.1 Mapeo geomorfológico de la zona de estudio, recuadro rojo en donde se ubica Lago Edita.*

Los resultados muestran distintos niveles de deltas y líneas de costa, de los cuales los deltas fueron catalogados en niveles según su altitud, mientras que las líneas de costa sirvieron para confirmar en los alrededores de los deltas como en lugares más alejados. Los niveles de deltas identificados son: Nivel 0 al nivel del agua cercano a los 200 msnm, Nivel 1 alrededor de 320 msnm, Nivel 2 entre 430 y 440 msnm y Nivel 3 alrededor de 500 msnm.

## 4.2. Estratigrafía y sedimentología

En el marco de esta investigación se llevaron a cabo distintos análisis (al segmento 9 del testigo PC0902CT) con el objetivo de tener una comprensión más profunda de la estratigrafía y sedimentología. En primer lugar, se desarrolló un análisis visual que dio como resultado una columna esquemática denotando su litología y estructuras reconocibles. Luego, la tomografía fue contrastada con este primer análisis para la identificación de estructuras no reconocibles previamente. Por último, un análisis de la granulometría para reconocer el tamaño de grano de los sedimentos que componen al testigo.

## 4.2.1. Estratigrafía

Se construyó una columna esquemática a partir del análisis visual del testigo en Figura 4.2 que será mostrada a continuación:

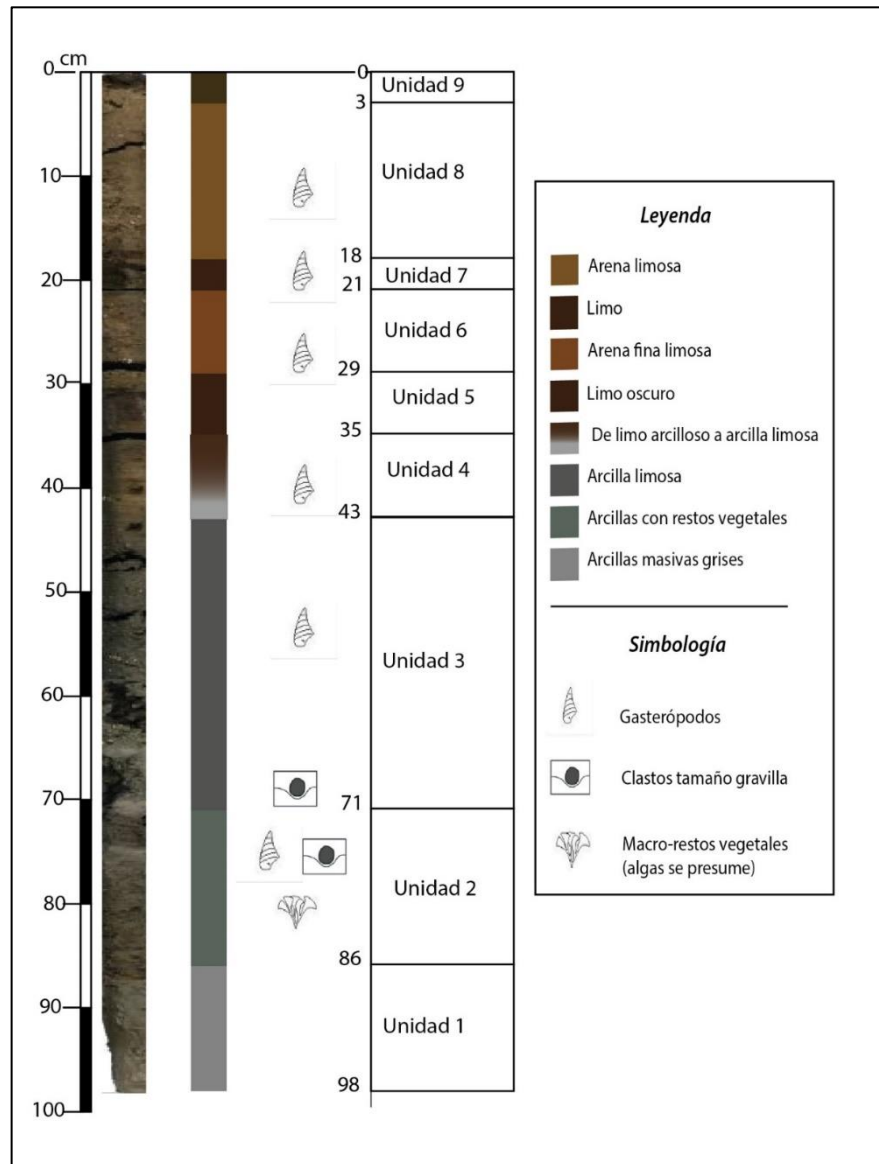


Figura 4.2 Columna estratigráfica del registro de sedimentos testigo PC0902CT9 Lago Edita.

Tabla 4.1 Descripción visual de la estratigrafía.

<i>Unidades</i>	<i>Profundidad de inicio y termino (cm)</i>	<i>Descripción</i>
Unidad 1	86-98	Arcillas grises masivas, sin estructuras reconocibles. Contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad 2	71-86	Arcillas grises, se reconocen restos de raíces a lo largo de la unidad, en el techo también se reconocen clastos tamaño gravilla. Contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad 3	43-71	Arcillas limosas grises, con bioclastos presentes y se reconocen clastos (angulosos) de tamaño gravilla en la base de la unidad. Contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad 4	35-43	Comienza con arcillas limosas de tonalidades grises que gradualmente cambia a, con transición gradual a limos arcillosos de color marrón. Bioclastos esqueletales de gasterópodos presentes. Contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad 5	29-35	Limos color marrón oscuro, bioclastos esqueletales de gasterópodos. Contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad 6	21-29	Arenas finas limosas color marrón, con bioclastos esqueletales de gasterópodos presentes. Contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad 7	18-21	Limo marrón, bioclastos esqueletales, posiblemente gasterópodos. Contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad 8	3-18	Arenas limosas, color marrón claro, bioclastos presentes (tamaños similares de orden de un par de centímetros) y gasterópodos. Contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad 9	0-3	Limos oscuros.

## 4.2.2. Tomografía

Los resultados de la tomografía muestran estructuras no detectables al ojo desnudo, por lo que en esta sección se identificaron estructuras y se corroboraron las ya identificadas previamente. Se usaron las mismas divisiones de la estratigrafía para complementar con la visión interna del testigo. Se identificaron las estructuras en Figura 4.3 y se describieron en Tabla 4.2

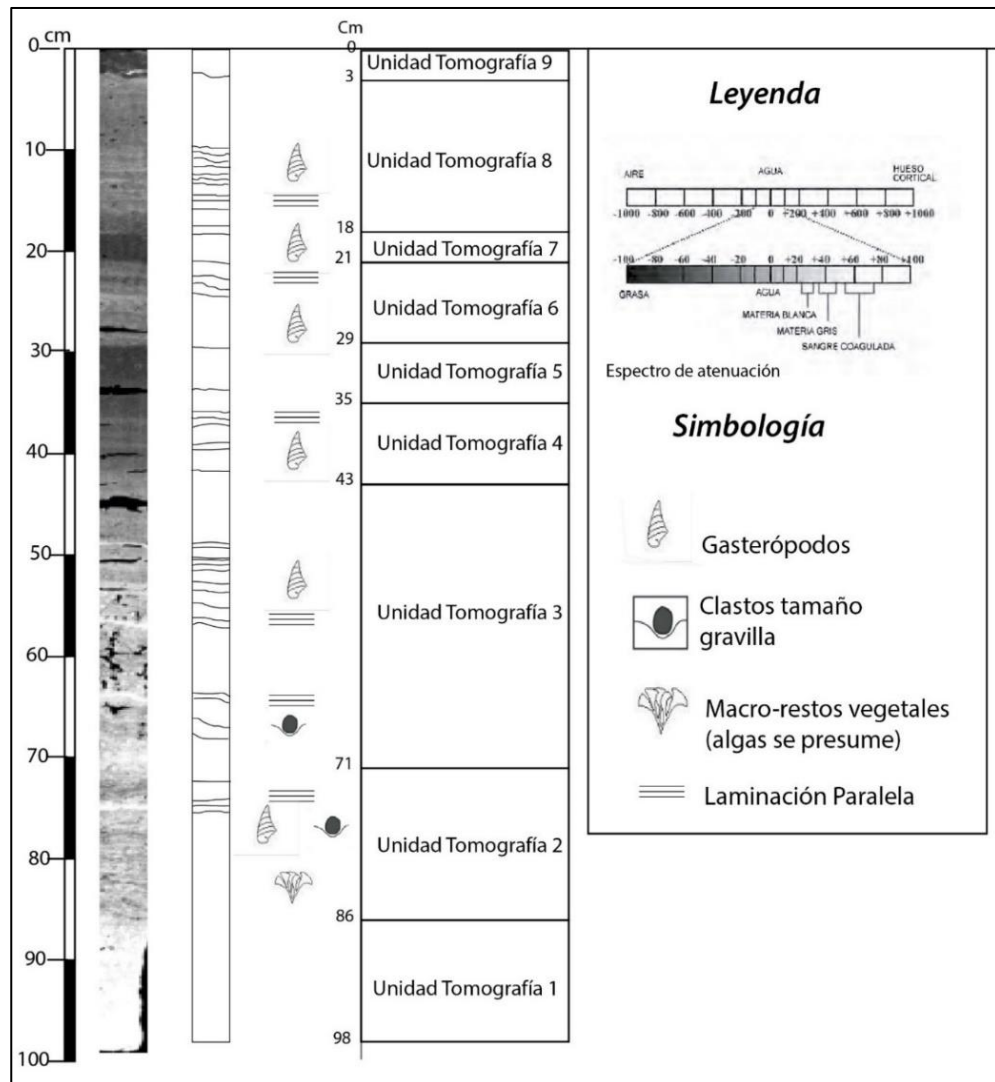


Figura 4.3 Esquema de tomografía del testigo PC0902CT9, en donde las estructuras son identificadas.

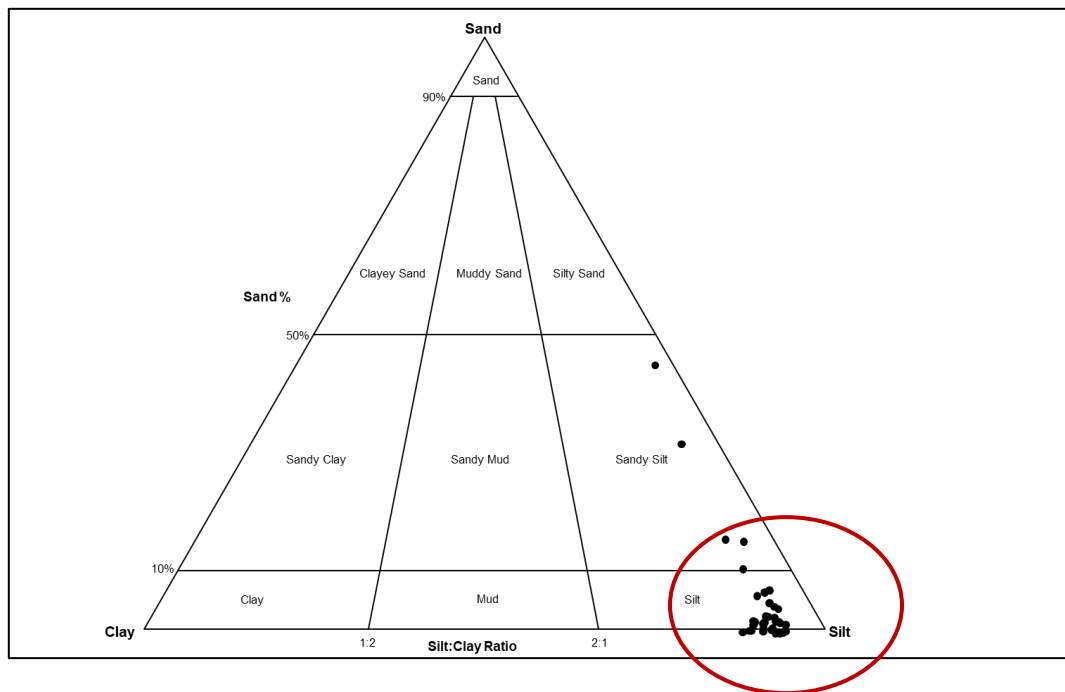
Tabla 4.2 Descripción de estructuras identificadas en la tomografía.

<i>Unidades</i>	<i>Profundidad techo-base (cm)</i>	<i>Descripción</i>
Unidad Tomografía 1	86-98	No se distinguen estructuras ni bioclastos, masiva, se observa un contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad Tomografía 2	71-86	Un par de laminaciones de alta atenuación reconocidas, se identificaron bioclastos de gasterópodos, macro-restos vegetales (las algas se ven con este efecto de estática en la unidad) y hacia el techo se identifican clastos tamaño gravilla. Se observa un contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad Tomografía 3	43-71	Se identifica laminación, tiene presencia de bioclastos de gasterópodos y se identificaron clastos de tamaño gravilla, (rocas tienen una atenuación alta y se destacan) hacia la base de la unidad. Contacto concordante.
Unidad Tomografía 4	35-43	Laminación paralela identificada junto con bioclastos. Se observa un contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad Tomografía 5	29-35	No se reconocen estructuras, se identifican bioclastos. Se observa un contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad Tomografía 6	21-29	Se identifica laminación paralela y presenta bioclastos esqueléticos de. Se observa un contacto concordante con la unidad anterior mostrando una mayor atenuación en general.
Unidad Tomografía 7	18-21	Presenta bioclastos esqueléticos de gasterópodos, se observa un contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad Tomografía 8	3-18	Se reconoce laminación paralela por diferencias de atenuación en cada horizonte, también se identifican bioclastos esqueléticos en espiral, gasterópodos. Se observa un contacto concordante con la unidad anterior.
Unidad Tomografía 9	0-3	Capa superficial, sin estructuras



### 4.2.3. Sedimentología

Se efectuó un análisis granulométrico en distintos puntos del testigo, escogidos estratégicamente desde el cm 36 hasta el cm 95 del testigo PC0902CT9. El análisis general muestra en el diagrama Arena-Limo-Arcilla (Figura 4.4) en donde se observa que la mayoría de las muestras se agrupan en la sección de tamaño limo y una menor cantidad arcillas y arenas (finas).



*Figura 4.4 Diagrama Arena-Arcilla-Limo general de las muestras del testigo PC0902CT9, mostrando la tendencia de los tamaños de las muestras (círculo rojo).*

Los resultados de granulometría por Unidad se tienen en la Figura 4.5, que también incluye los puntos de muestreo y las curvas granulométricas (promedio por Unidad). Las curvas granulométricas se muestran los límites del tamaño limo dejando al lado izquierdo el tamaño arcilla y al lado derecho las arenas finas. Se observa la evolución de los tamaños de grano a través de las unidades resumidas en la siguiente tabla:

*Tabla 4.3 Descripción Granulometría testigo PC0902CT9.*

<i>Unidad</i>	<i>Moda granulométrica</i>	<i>Porcentajes medios</i>	<i>Menores porcentajes (proporción)</i>
1	Limo	Arcilla	Arenas (muy bajos)
2	Limo	Arcilla	Arenas (muy bajos)
3	Limo	Arcilla	Arenas (bajos)
4	Limo	Arcilla	Arenas (medios)

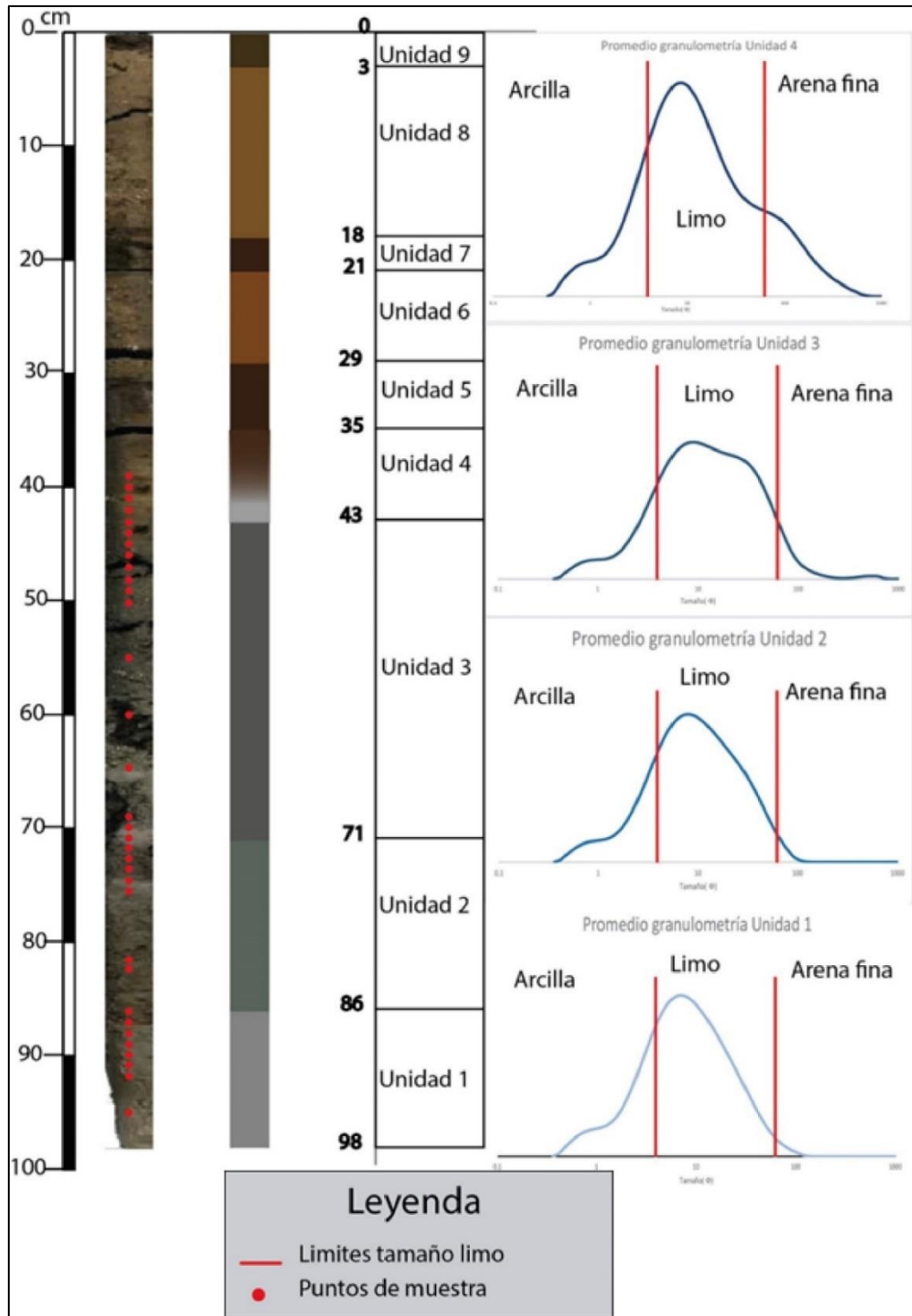


Figura 4.5 Granulometría y los puntos de muestreo del testigo PC0902CT9, resultados promedio de la granulometría en unidades estratigráficas.

### 4.3. Química Inorgánica

Para la química inorgánica se pudieron reconocer 3 horizontes geoquímicos que están relacionados con los patrones y tendencias de las señales de los elementos. Los límites entre horizontes se definieron a partir de puntos de inflexión consistentes en momentos en donde las señales cambian su comportamiento en las intensidades de las señales. Se graficaron los resultados (Figura 4.6), los cuales consisten en conteos de las señales elementales vs la profundidad del testigo. La descripción de cada horizonte se describe en la Tabla 4.4.

*Tabla 4.4 descripciones de los resultados de FRX, en donde se identifican unidades y patrones de diferentes elementos.*

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Características Geoquímicas</i>
I	80-91	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales altas y variables para los elementos → Fe, Mn</li> <li>• Señales altas y estables para los elementos → Al, Si</li> <li>• Señales medias y variables para los elementos → Rb.</li> <li>• Señales medias y estables para los elementos → Ti, K.</li> <li>• Señales bajas y estables para los elementos → Sr.</li> <li>• Señales nulas, inexistentes o esporádicas para los elementos → Ca.</li> </ul>
II	40-80	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales altas y variables para los elementos → Fe, K, Al.</li> <li>• Señales medias y variables para los elementos → Si Rb.</li> <li>• Señales medias y estables para los elementos → Ti.</li> <li>• Señales bajas y estables para los elementos → Mn, Ca, Sr.</li> </ul>
III	0-40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales altas y variables para los elementos → Si, Mn.</li> <li>• Señales bajas y variables para los elementos → Ca, Sr, Fe.</li> <li>• Señales medias y variables para los elementos → Al.</li> <li>• Señales medias y estables para los elementos → Ti, K, Rb.</li> </ul>

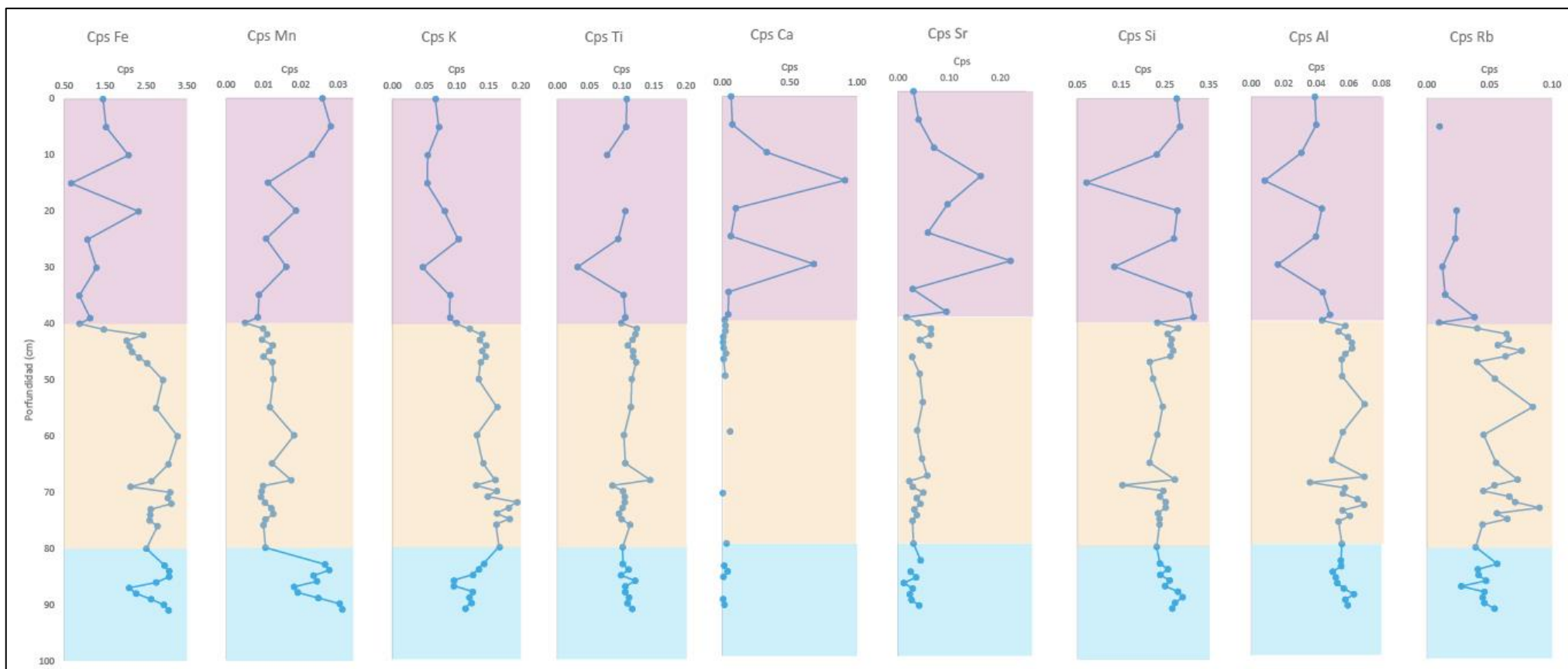


Figura 4.6 Resultados de la geoquímica de elementos mayores en testigo PC0902CT9, Horizonte (I) en celeste, (II) en anaranjado y (III) en rosado.

Además, se evaluaron las razones elementales que sirven de proxy de reacciones que pudieron ocurrir en un ambiente de este tipo. En Figura 4.7

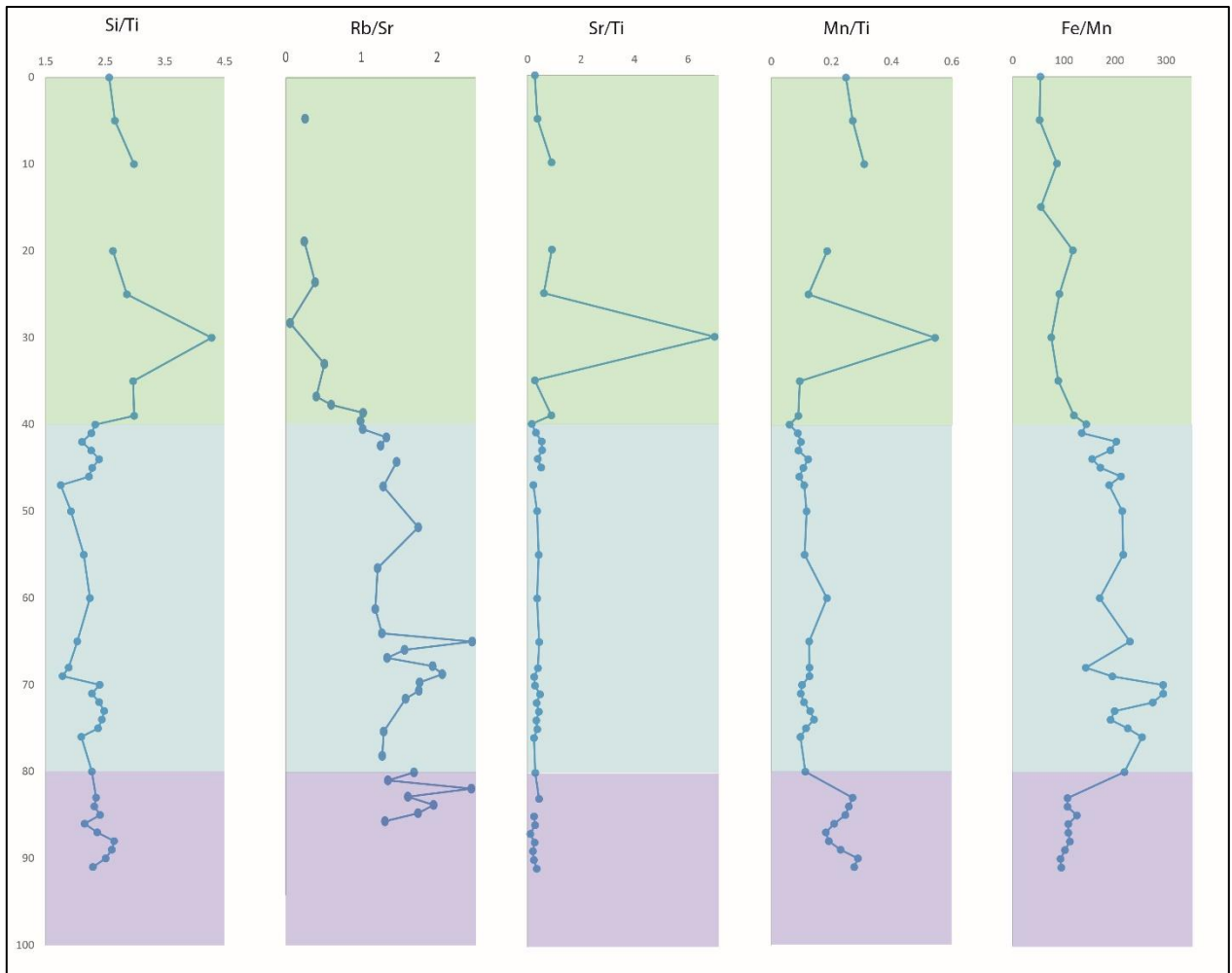


Figura 4.7 Razones químicas de elementos del testigo PC0902CT9, identificando Horizonte (I) en color purpura, (II) en azul y (III) en verde.

Tabla 4.5 Descripción comportamiento según horizonte y razón química.

Razones	Unidades y Valores de razones.
[Si/Ti]	(I) Razón baja y levemente variable. (II) Razón baja y estable. (III) Razón media y variable.
[Rb/Sr]	(I) Razón alta y variable. (II) Razón media y variable. (III) Razón baja y variable.
[Sr/Ti]	(I) Razón baja y estable. (II) Razón baja y estable. (III) Razón baja y estable.
[Mn/Ti]	(I) Razón media y variable. (II) Razón media y estable. (III) Razón baja y variable.
[Fe/Mn]	(I) Razón baja y estable. (II) Razón media y variable. (III) Razón baja y variable.

# Capítulo 5: Discusión

## 5.1. Geomorfología y evolución del sistema de lagos

Los resultados de la geomorfología sugieren la existencia de diferentes niveles de inundación en el Lago General Carrera, con elevaciones entre 500 y 200 metros sobre el nivel del mar, en específico las elevaciones del brinkpoint de los deltas. Estos corresponden a distintos niveles de deltas identificados desde el nivel 0, el actual hasta el nivel 3, el más elevado. Esto podría interpretarse como un descenso progresivo del nivel de agua del lago. Además, para las geomorfologías como deltas emergidos se generen, se necesita un tiempo de estabilidad.

De acuerdo con la reconstrucción ambiental de Vásquez et al., (2022), los niveles deltaicos del Lago General Carrera estuvieron condicionados por procesos glaciares, considerando retroceso inicial, que comienza la generación de un lago proglaciar. De esta forma, se conoce que la zona tiene una importante influencia glacial y que los descensos del nivel de agua del lago están regidos por los drenajes. Finalmente, retrocesos posteriores abrieron nuevos drenajes, lo que se vincula con el descenso progresivo de los niveles de deltas y paleolíneas. Esto fue propuesto en Espíndola (2022), Vásquez et al., (2022) y Vásquez (2022) en donde se estudian los niveles deltaicos del Lago General Carrera y del Lago Cochrane. En algún momento estos lagos (Lago General Carrera y Lago Cochrane) estuvieron unidos, generando un sistema de lagos (Figura 2.7), en donde se vincula el Lago Edita a una altitud de alrededor de los 520 msnm siendo similar a los niveles más altos registrados. Esto permite interpretar que el Lago Edita fue parte de este sistema de lagos propuesto. Consistiendo con los trabajos de Villa-Martínez et al. (2012) y Moreno et al. (2018), en donde se propone el avance de un lóbulo glacial del PIS en ambos lagos y que el valle Chacabuco tiene un origen glacial. Se unieron las propuestas de: los niveles de inundación en Vásquez et al. (2022), el alcance del PIS en Bourgois et al. (2016) y el origen del valle Chacabuco en Stern et al. (2016) y en Villa-Martínez et al. (2012) para generar una propuesta de un modelo evolución ambiental en la ubicación del Lago Edita.



## 5.2. Reconstrucción ambiental Lago Edita.

Para la identificación ambiental se tomaron en cuenta los tamaños de grano, la estratigrafía, sobre todo la información proporcionada por estructuras sedimentarias y los horizontes definidos a partir de la geoquímica como se puede observar en Figura 5.1.

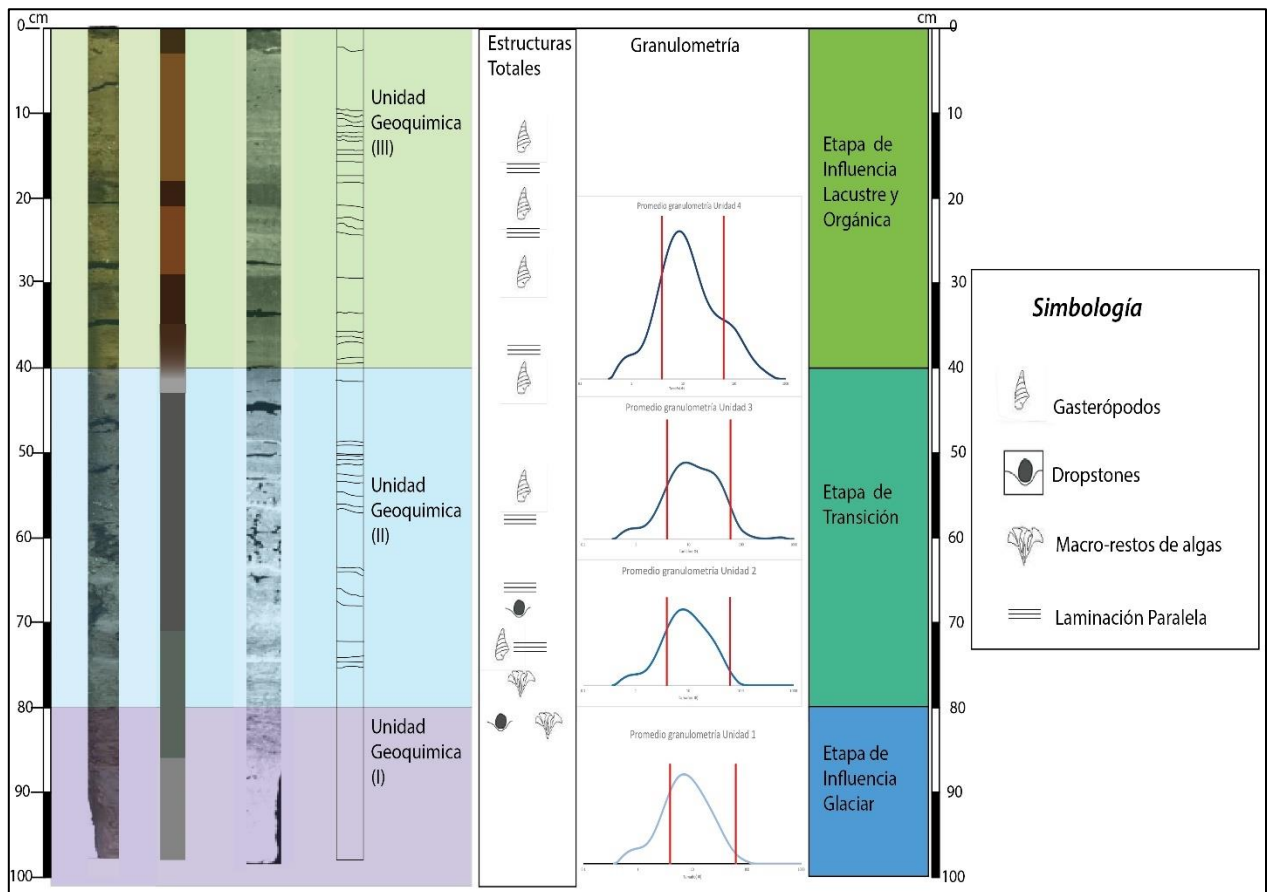


Figura 5.1 Reconstrucción ambiental del testigo PC0902CT9, a través de la integración de los resultados estratigráficos sedimentológicos y geoquímicos.

Tabla 5.1 Identificación e interpretación de estructuras testigo PC0902CT9

Estructura interpretada	Profundidad (cm)	Horizonte geoquímico	Litología (profundidad y Horizonte)	Interpretación Ambiental
Laminación Paralela	10, 15, 38, 50, 60, 65 y 75	(I)→ [10,15, 38] (II)→ [50, 60, 75]	(I)→10 y 15: arena limosa; 38: limo arcilloso. (II)→50 y 60: arcilla limosa; 75: arcillas con macro-restos de algas.	Ambiente de baja energía→ Lacustre
Bioclastos de gasterópodos	10, 22, 27, 40, 55 y 73	(I)→ [10, 22, 27, 40] (II)→[40, 55, 73]	(I)→10 y 15: arena limosa; 22: limos oscuros; 27: arena fina limosa y 40: arcilla limosa. (II)→ 40 y 55: limo arcilloso; 73: arcillas con macro-restos de algas.	Ambiente de baja energía, con capacidad de albergar vida→ Lacustre
Macro-restos de algas	72 y 83	(II)→[72] (III)→[83]	(II)→ Arcillas con macro-restos de algas. (III)→ Arcillas con macro-restos de algas.	Ambiente con algas, y de baja energía→ Lacustre
Dropstones	70 y 83	(II)→[70] (III)→[83]	(II)→ Arcilla limosa (III)→ Arcilla con macro-restos de algas.	Ambiente Glaciar distal clastos tamaño gravilla inmersos en matriz arcillosa.

Tabla 5.2 Identificación y reconstrucción ambiental en etapas del testigo PC0902CT9

Etapa	Ambiente y justificación ambiental
Primera (I)	<p><u>Glaciar</u>→ Estructuras de dropstones en una matriz arcillosa. Granulometría sugiere un ambiente tranquilo de baja energía y junto con las estructuras de dropstone se interpreta como sedimentación por decantación, denotando una zona distal/proximal al cuerpo de hielo. La geoquímica propone un ambiente medianamente oxigenado con un decaimiento en el techo (Mn/Ti) lo que concuerda con la aparición de algas, un ambiente reductor y del mismo modo hacia el techo más oxidantes (Fe/Mn) y finalmente, Rb/Sr da indicios de condiciones frías y/o húmedas durante esta etapa.</p>
Segunda (II)	<p><u>Glaciar</u>→ Estructuras de dropstone dentro de matriz arcillosa con y sin restos de algas. Dropstones implican un transporte asociado y una distancia del cuerpo de hielo, del mismo modo el tamaño de grano se interpreta como sedimentación por decantación denotando una zona distal con respecto al glaciar.</p> <p><u>Lacustre</u>→ Estructuras de laminación paralela plantean un ambiente tranquilo de baja energía primeras apariciones en la base y con mayor densidad hacia el techo. Aumento progresivo del tamaño de grano (respecto al porcentaje de arcillas, limo y arenas) y aparición de bioclastos de gasterópodos presentes a lo largo de la etapa.</p> <p>Química→ Bajamente oxigenado (Mn/Ti), ambiente oxidante (Fe/Mn) y una tendencia a condiciones más cálidas y/o secas (Rb/Sr).</p> <p>Ambiente transicional, con inicios de régimen glaciar que se solapan con procesos lacustres orgánicos que terminan predominando en el techo de la etapa.</p>
Tercera (III)	<p><u>Lacustre</u> → Estructuras de laminación paralela proponen un ambiente tranquilo y de baja energía aumentando progresivamente sus apariciones hacia el techo. Aumento de tamaño de grano (menor porcentajes de arcillas y mayor de arenas) y coloración más oscura (de procesos orgánicos) en los sedimentos. Bioclastos presentes actuando como bioindicadores de condiciones ambientales dentro del agua, cómo condiciones mínimas de oxígeno, temperatura y de alimentación. La química se encuentra estable en esta etapa, sugiriendo un ambiente medianamente oxigenado (Mn/Ti), reductor (Fe/Mn), con un aumento del tamaño de grano (Si/Ti y Sr/Ti) y condiciones más secas y/o cálidas (Rb/Sr).</p>

En Henríquez (2014) se estableció la cronología en un testigo de serie paralela, PC0902AT9, usando técnicas de radiocarbono y calibraciones pertinentes, proponiendo una edad de  $14830 \pm 45$  años antes del presente, datado en la zona del techo de este segmento del testigo. Por lo que se le establece una edad mínima para el segmento estudiado (PC0902CT9). Esta edad corresponde a los inicios de la Última Terminación Glaciar, lo que es consistente con el modelo de etapas propuesto, que en definitiva se trata de un retroceso glaciar y los cambios de régimen dentro del Lago Edita.

En los resultados del mapeo geomorfológico se identifican deltas emergidos y líneas de costa, en altitudes similares, lo que permite interpretar un descenso progresivo del nivel de agua del Lago General Carrera. La evolución del sistema de lagos formado por el Lago General Carrera, Lago Cochrane y Lago Edita (Valle Chacabuco), fue propuesta en Vásquez (2022) (Figura 2.7). En este trabajo se interpreta que el descenso y separación de los lagos se fue dando de forma progresiva junto con del retroceso del PIS, que se encontraba en el ocaso de su extensión.

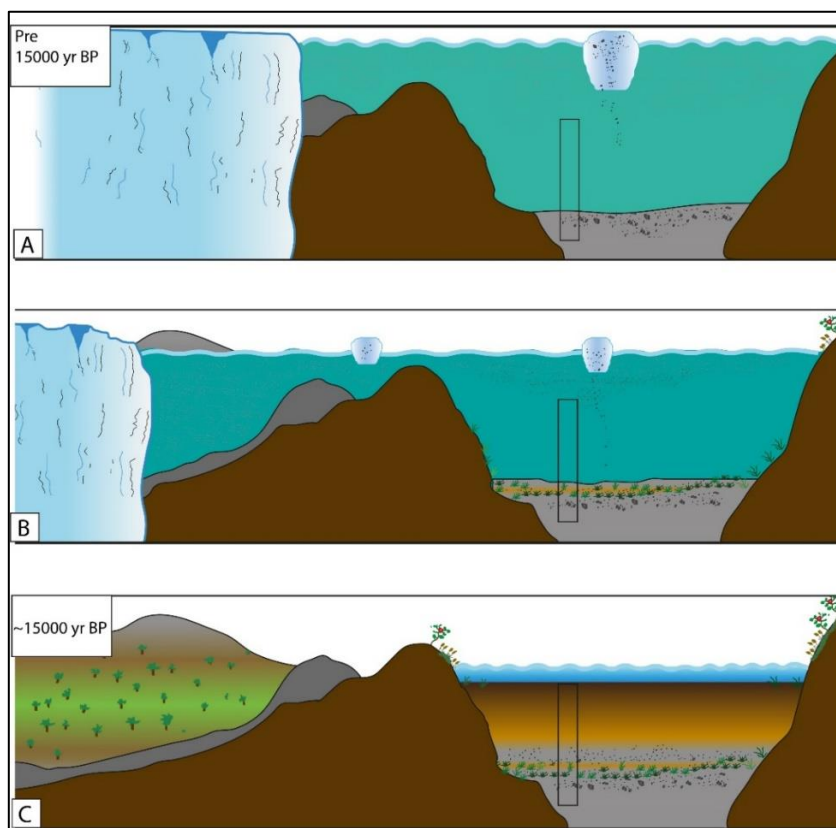


Figura 5.2 Modelo Evolutivo esquemático del registro sedimentario del testigo PC0902CT9 del Lago Edita. Se disponen las tres etapas discutidas anteriormente, con sus rasgos característicos.

Finalmente, se propone un modelo evolutivo para el Lago Edita, esquematizado en Figura 5.2, en dónde se tiene el registro sedimentario registrado en el testigo PC0902CT9, los ambientes y procesos interpretados. También se estima una edad de alrededor de 15000 años antes del presente para el sector del techo del testigo por lo que se puede inferir condiciones netamente lacustres desde entonces. Esto concuerda con lo propuesto en Palacios et al. (2020) al respecto del porcentaje de extensión del PIS (20%-40%) en edades entre los 16000 y 14000 años antes del presente, sin embargo las direcciones de su extensión son desconocidas, se puede establecer que en este sector no se tiene presencia glaciar.

## Capítulo 6 : Conclusión

Los resultados del testigo proporcionan evidencia de una evolución de procesos ambientales, con evidencias en la sedimentología, estratigrafía y geoquímica. Se fue posible identificar dos ambientes immaculados y una etapa de procesos mixtos, lo que fue interpretado como una etapa de transición. A medida que el glaciar se volvía más distal, los procesos glaciares perdieron influencia dando espacio a la ocurrencia de procesos más lacustres orgánicos. Los resultados de la geoquímica fueron fundamentales para la identificación de cambios ambientales. La química del lecho lacustre es el resultado de procesos ambientales ocurriendo de forma continua por lo que cambios de comportamiento implicarían un cambio en el ambiente. Con una idea general de los puntos de inflexión, se incorporaron los resultados restantes para una distinción ambiental más precisa, involucrando una etapa glaciar inicial, una mixta de evolución progresiva y finalmente una lacustre.

La dinámica ambiental de la zona fue sometida a procesos glaciares durante el Último Máximo Glaciar. Procesos lacustres eran dependientes de procesos glaciares, inclusive en su retroceso. Estos dejan huella en el registro sedimentario y gracias a estos se puede interpretar condiciones ambientales. Se reconocieron etapas evolutivas que reconstruyen los procesos ocurridos dentro del registro del Lago Edita, los que también coinciden con el contexto y la dinámica de la zona en el Pleistoceno Tardío.

Los resultados de la geomorfología sugieren una evolución del nivel de inundación del Lago General Carrera, el cual por procesos de retroceso glaciar se acumuló y represó drenando agua hacia el océano Atlántico como se menciona en Bendle et al. (2017). El hielo represó el agua, al punto la unión de los Lagos General Carrera y Lago Cochrane junto con el valle Chacabuco. Según la disposición del hielo, se generaban fluctuaciones en los cambios de nivel de inundación. El nivel de inundación en el Valle Chacabuco fue tal, que incluyó al Lago Edita dentro de la inundación por lo que se le considera parte de este gran sistema de lagos represados por hielo. De acuerdo con una comparación con edades de testigos paralelos (Henriquez, 2014) con dataciones a niveles del techo de aproximadamente 15000 años antes del presente, es posible asignar una edad mínima al segmento estudiado, considerando la posición estratigráfica en la que se encuentra el punto de datación. Los resultados junto con las dataciones, ayudan a comprender y a acotar el modelo propuesto de lagos conectados de Vásquez (2022). Se pueden atribuir procesos lacustres (sin influencia glaciar) desde edades aproximadas de 15000 años antes del presente, en el sector del Lago Edita, estableciendo edad mínima y una distancia mínima fuera del alcance de los procesos glaciares.

Para terminar, la conexión entre el Lago General Carrera, Lago Cochrane y Lago Edita está estrechamente ligada al retroceso glaciario, en los niveles de inundación más altos registrados en la geomorfología y el cambio progresivo de ambiente registrado en los estudios del registro sedimentario del Lago Edita. Con estos resultados e interpretaciones se puede establecer una reconstrucción ambiental, en el punto del testigo, usando la datación relativa y el contexto de la zona de estudio, teniendo una independencia de procesos lacustres en la edad obtenida y pudiendo acotar edades de modelos de evolución y rellenando hiatos temporales.

# Bibliografía

- Aguinaga, H. F., Rivera, J. A., Tamayo, L. J., Tobón, M., & Osorno Ch, R. C. (2006). Tomografía axial computarizada y resonancia magnética para la elaboración de un atlas de anatomía segmentaria a partir de criosecciones axiales del perro. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 19(4), 451–459.
- Arche, A. (2010). Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria. *Sedimentología*, 11–1287.
- Bendle, J. M., Palmer, A. P., Thorndycraft, V. R., & Matthews, I. P. (2017a). High-resolution chronology for deglaciation of the Patagonian Ice Sheet at Lago Buenos Aires (46.5°S) revealed through varve chronology and Bayesian age modelling. *Quaternary Science Reviews*, 177, 314–339. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.10.013>
- Bendle, J. M., Palmer, A. P., Thorndycraft, V. R., & Matthews, I. P. (2017b). High-resolution chronology for deglaciation of the Patagonian Ice Sheet at Lago Buenos Aires (46.5 S) revealed through varve chronology and Bayesian age modelling. *Quaternary Science Reviews*, 177, 314–339.
- Benn, D., & Evans, D. J. A. (2014). *Glaciers and glaciation*. Routledge.
- Bennett, M. M., & Glasser, N. F. (2011). *Glacial geology: ice sheets and landforms*. John Wiley & Sons.
- Blott, S. J. (2000). GRADISTAT Version 4.0: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments by sieving or laser granulometer. URL: [Http://Www.kpal.co.uk/Gradistat\\_abstract.htm](http://www.kpal.co.uk/Gradistat_abstract.htm).
- Bourgeois, J., Cisternas, M. E., Braucher, R., Bourlès, D., & Frutos, J. (2016). Geomorphic records along the General Carrera (Chile)-Buenos Aires (Argentina) glacial lake (46°-48°S), climate inferences, and glacial rebound for the past 7-9 ka. *Journal of Geology*, 124(1), 27–53.



<https://doi.org/10.1086/684252>

Clark, P. U., Dyke, A. S., Shakun, J. D., Carlson, A. E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J. X., Hostetler, S. W., & McCabe, A. M. (2009). The last glacial maximum. *Science*, *325*(5941), 710–714.

Cnudde, V., Masschaele, B., Dierick, M., Vlassenbroeck, J., Hoorebeke, L. Van, & Jacobs, P. (2006). Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool. *Applied Geochemistry*, *21*(5), 826–832. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.02.010>

Croudace, I. W., & Rothwell, R. G. (2015). *Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of a non-destructive tool for the environmental sciences* (Vol. 17). Springer.

Davies, B. J., Darvill, C. M., Lovell, H., Bendle, J. M., Dowdeswell, J. A., Fabel, D., García, J.-L., Geiger, A., Glasser, N. F., & Gheorghiu, D. M. (2020). The evolution of the Patagonian Ice Sheet from 35 ka to the present day (PATICE). *Earth-Science Reviews*, *204*, 103152.

Denton, G. H., Anderson, R. F., Toggweiler, J. R., Edwards, R. L., Schaefer, J. M., & Putnam, A. E. (2010). The last glacial termination. *Science*, *328*(5986), 1652–1656.

Espíndola Rosales, M. J. (2022). *Variaciones hidroclimáticas desde el pleistoceno tardío en Patagonia Central a partir del estudio de facies deltaicas emergidas del Lago General Carrera (46° S), Región de Aysén.*

Fernández, M., Björck, S., Wohlfarth, B., Maidana, N. I., Unkel, I., & Van der Putten, N. (2013). Diatom assemblage changes in lacustrine sediments from Isla de los Estados, southernmost South America, in response to shifts in the southwesterly wind belt during the last deglaciation. *Journal of Paleolimnology*, *50*(4), 433–446. <https://doi.org/10.1007/s10933-013-9736-4>

Goudie, A. S. (2006). *Goudie Encyclopedia of Geomorfology* (Vol. 1, Issue 1). <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>

Haberzettl, T., Corbella, H., Fey, M., Janssen, S., Lücke, A., Mayr, C., Ohlendorf, C., Schäbitz, F., Schleser, G. H., Wille, M., Wulf, S., & Zolitschka, B. (2007). Lateglacial and Holocene wet-dry cycles in southern Patagonia: Chronology, sedimentology and geochemistry of a

- lacustrine record from Laguna Potrok Aike, Argentina. *Holocene*, 17(3), 297–310. <https://doi.org/10.1177/0959683607076437>
- Henriquez Gonzalez, W. I. (2014). *Variaciones de la vegetación y clima en Patagonia Norte y Centro desde el último máximo glacial*.
- Henríquez, W. I., Villa-Martínez, R., Vilanova, I., Pol-Holz, D., & Moreno, P. I. (2017). The last glacial termination on the eastern flank of the central Patagonian Andes (47 S). *Climate of the Past*, 13(7), 879–895.
- Hoek, W. Z. (2008). The last glacial-interglacial transition. *Episodes Journal of International Geoscience*, 31(2), 226–229.
- Minería, C. S. N. de G. y, & de la Cruz, R. (2004). *Geología del área oriental de las hojas Cochran y Villa O'Higgins: región Aisén del general Carlos Ibáñez del Campo*. Servicio nacional de Geología y Minería.
- Moreno, A., Giralt, S., Valero-Garcés, B., Sáez, A., Bao, R., Prego, R., Pueyo, J. J., González-Sampériz, P., & Taberner, C. (2007). A 14 kyr record of the tropical Andes: The Lago Chungará sequence (18°S, northern Chilean Altiplano). *Quaternary International*, 161(1), 4–21. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.020>
- Moreno, P. I., Videla, J., Valero-Garcés, B., Alloway, B. V., & Heusser, L. E. (2018). A continuous record of vegetation, fire-regime and climatic changes in northwestern Patagonia spanning the last 25,000 years. *Quaternary Science Reviews*, 198, 15–36. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.08.013>
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley & Sons.
- Palacios, D., Stokes, C. R., Phillips, F. M., Clague, J. J., Alcalá-Reygosa, J., Andrés, N., Angel, I., Blard, P.-H., Briner, J. P., & Hall, B. L. (2020). The deglaciation of the Americas during the Last Glacial Termination. *Earth-Science Reviews*, 203, 103113.
- Renter, J. A. M. (1989). Applications of computerized tomography in sedimentology. *Marine Georesources & Geotechnology*, 8(3), 201–211.

- Ruddiman, W. F. (2001). *Earth's climate: past and future*. Macmillan.
- Shala, S., Helmens, K. F., Jansson, K. N., Kylander, M. E., Risberg, J., & Löwemark, L. (2014). Palaeoenvironmental record of glacial lake evolution during the early Holocene at Sokli, NE Finland. *Boreas*, *43*(2), 362–376. <https://doi.org/10.1111/bor.12043>
- Stern, C. R., Moreno Moncada, P., Henríquez, W. I., Villa Martínez, R., Sagredo, E., Aravena, J. C., & Pol-Holz, R. de. (2016). *Holocene tephrochronology around Cochrane (~ 47 S), southern Chile*.
- Unkel, I., Björck, S., & Wohlfarth, B. (2008). Deglacial environmental changes on Isla de los Estados (54.4°S), southeastern Tierra del Fuego. *Quaternary Science Reviews*, *27*(15–16), 1541–1554. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.05.004>
- Unkel, I., Fernandez, M., Björck, S., Ljung, K., & Wohlfarth, B. (2010). Records of environmental changes during the Holocene from Isla de los Estados (54.4°S), southeastern Tierra del Fuego. *Global and Planetary Change*, *74*(3–4), 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.07.003>
- Vaasma, T. (2008). Grain-size analysis of lacustrine sediments: a comparison of pre-treatment methods. *Estonian Journal of Ecology*, *57*(4).
- Vásquez, A., Flores-Aqueveque, V., Sagredo, E., Hevia, R., Villa-Martínez, R., Moreno, P. I., & Antinao, J. L. (2022). Evolution of Glacial Lake Cochrane During the Last Glacial Termination, Central Chilean Patagonia (~ 47° S). *Frontiers in Earth Science*, *10*, 22.
- Vásquez Parraguez, A. P. (2022). *Evolución del margen oriental del Campo de Hielo Norte durante la última terminación glacial a partir del estudio morfoestratigráfico de los valles General Carrera y Cochrane*.
- Villa-Martínez, R., Moreno, P. I., & Valenzuela, M. A. (2012). Deglacial and postglacial vegetation changes on the eastern slopes of the central Patagonian Andes (47°S). *Quaternary Science Reviews*, *32*, 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.11.008>