



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas
Biología

**RECONSTRUCCIÓN DE LAS CONDICIONES TRÓFICAS DE LAGUNA
ESPEJO (X REGIÓN DE LOS LAGOS) MEDIANTE EL USO DE DIATOMEAS
Y PARÁMETROS FÍSICOS-QUÍMICOS CONTENIDOS EN UN PERFIL
SEDIMENTARIO.**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción para optar al título de Bióloga.

POR: Javiera Luján Bascur Fuentes
Profesora Guía: Fabiola Jacqueline Cruces López

Abril, 2023
Concepción, Chile

Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas

Este Seminario de Título ha sido realizado en el Departamento de Botánica de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción.

Profesora guía

Dra. Fabiola Cruces López

Universidad de Concepción

Concepción

Profesores evaluadores

Dr. Alberto Araneda Castillo

Universidad de Concepción

Concepción

Dr. Víctor Hernández Santander

Universidad de Concepción

Concepción

AGRADECIMIENTOS

A mi profesora guía Dra. Fabiola Cruces por aceptarme como su alumna y guiarme durante los últimos dos años en esta investigación. Por enseñarme con paciencia cada una de las metodologías utilizadas para la identificación taxonómica de diatomeas, por siempre darse el tiempo de resolver mis infinitas dudas, por su paciencia y por entender que llegar temprano no era mi fuerte.

A mi profesor co-guía Dr. Alberto Araneda por abrirme las puertas de su laboratorio, y por permitirme cursar la asignatura “Introducción al ambiente estadístico: Rstudio”, donde aprendí lo indispensable para llevar a cabo los análisis estadísticos de esta investigación.

A mis padres, Mónica y Alex, por apoyarme en cada una de las situaciones que viví en el transcurso de la carrera, por estar siempre pendientes de mí y jamás presionarme a egresar rápido. Por darme la oportunidad de siempre elegir lo que me hace feliz.

A mis hermanas, Constanza y Macarena, por siempre sacarme una risa, hasta en los días más abrumadores.

A mis abuelos, Alberto y Mónica, por su amor incondicional y por entender mi ausencia estos últimos veranos.

A mi pololo, Gabino, por su paciencia infinita, por el sacrificio de acompañarme al laboratorio a ver muestras hasta las tantas de la madrugada y por luchar contra sus ganas de dormir sólo para darme apoyo moral durante el tiempo que escribí esta tesis.

A mis amigos y compañeros de laboratorio, que fueron un apoyo fundamental durante todo este proceso, por hacer los días más amenos y por regalarme siempre con alguna cosita a pesar de mis mañas.

A Betsabé y Romina por ser mis compañeras y amigas desde el primer día de carrera, por estar para mí cuantas veces lo necesité.

A mi prima Cindy, porque nada de esto hubiera sido posible sin ella que aquella tarde de enero de 2017, cuando estaba confundida y no tenía idea que estudiar, me invitó a comer y me habló de su carrera en tiempo récord, metiendo en mí el bichito de estudiar Biología.

Al Centro de Espectroscopía y Microscopía Electrónica de la Universidad de Concepción.

Financiamiento: FONDECYT N° 1201277: “Determining the sensitivity of lake sediment proxies to late Holocene climate variability: a test from a longitudinal study in Northern Patagonia across the Andes.”

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	9
2	HIPÓTESIS	15
3	OBJETIVO GENERAL	15
4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
5	MATERIALES Y MÉTODOS	16
5.1	Área de estudio.....	16
5.2	Obtención de material sedimentario.....	19
5.3	Geocronología de los sedimentos.....	20
5.4	Ensamble diatomológico	21
5.5	Análisis sedimentológico.....	22
5.5.1	Contenido de materia orgánica	22
5.5.2	Contenido de carbonatos	23
5.5.3	Susceptibilidad magnética.....	23
5.5.4	Fósforo	23
5.5.5	Relación Carbono/Nitrógeno	23
5.5.6	Sílice biogénica	24
5.5.7	Pigmentos	24
5.6	Análisis de resultados	25
6	RESULTADOS	26
6.1	Geocronología de los sedimentos.....	26
6.1.1	Modelo cronológico	26
6.2	Ensamble diatomológico	27
6.3	Análisis sedimentológico.....	31
6.3.1	Pigmentos	34
6.4	Análisis multivariado	37
7	DISCUSIÓN	39
7.1	Desarrollo de Laguna Espejo durante el período de asentamientos humanos (1900-2022 AD).....	42
8	CONCLUSIÓN	45
9	BIBLIOGRAFÍA	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de tefras presentes en sedimento de lago Espejo.	26
Tabla 2. Detalle del comportamiento de los datos: mínima, máxima, media y mediana.	31
Tabla 3. Detalle del comportamiento de los datos: Clorofila-a, Clorofila-b, Diatoxantina y Carotenoides.	34

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Representación esquemática del proceso de sedimentación en sistemas acuáticos. Extraído de García-Rodríguez 2002.....	11
Figura 2. Ubicación de Laguna Espejo.....	17
Figura 3. Batimetría de Laguna Espejo.	17
Figura 4. Red hidrográfica de Laguna Espejo.....	18
Figura 5. Radiografía y fotografía de testigo de Laguna Espejo Esp21-B (130 cm).	19
Figura 6. Modelo cronológico de lago Espejo utilizando tefras TES-01, TES-02, TES-03 y TES-04, realizado con rbacon 0.2.2 en Rstudio.....	26
Figura 7. Diatomeas sedimentarias de Laguna Espejo. (A) <i>Discostella stelligera</i> (B) <i>Encyonopsis cesatii</i> (C) <i>Staurosira construens</i> (D) <i>Brachysira lilliana</i> (E) <i>Achnanthis minutissimum</i> (F) <i>Pinnularia brebissonii</i> (G) <i>Staurosirella neopinnata</i> (H) <i>Staurosirella pinnata</i>	29
Figura 8. Diagrama estratigráfico de abundancias relativas de diatomeas sedimentarias de Laguna Espejo (>2%). Análisis DCA y análisis de agrupamiento mediante el método CONISS	30
Figura 9. Perfil estratigráfico de parámetros físico-químicos de Laguna Espejo. Se indica en línea punteada la división de las zonas según análisis de agrupamiento CONISS.....	32
Figura 10. Perfil estratigráfico de pigmentos. Se indica en línea punteada la división de las zonas según análisis de agrupamiento CONISS.....	35
Figura 11. RDA-triplot de sitios (negro), variables ambientales (azul) y diatomeas (rojo), basadas en los dos ejes (SMA: Susceptibilidad magnética, MO: Materia orgánica, Diatox: Diatoxantina).....	38

RESUMEN

Los sistemas lacustres son afectados por actividades antrópicas y por fenómenos del medio natural. Mediante el estudio de los registros sedimentarios (paleolimnología) podemos determinar las condiciones pasadas y el efecto de ambos eventos sobre los cuerpos de agua. Laguna Espejo, es un lago situado en la comuna de Futaleufú, al sur de Chile. En este lago se ha realizado un estudio paleolimnológico analizando registros fisicoquímicos y diatomológicos contenidos en un perfil sedimentario extraído del lago. Para este estudio se consideraron los primeros 50 cm del núcleo, que representan aproximadamente los últimos ~882 años. Los análisis de susceptibilidad magnética arrojaron un alza marcada en el año 1840, el cual se condice con la disminución de materia orgánica, carbonatos, nutrientes y pigmentos, lo que indicó la presencia de material volcánico en este punto. De acuerdo con la composición diatomológica se definieron 4 zonas a lo largo del perfil sedimentario, donde es posible observar un aumento de la abundancia relativa de especies *Staurosirella pinnata* y *Brachysira liliiana* lo que indicarían una baja cantidad de nutrientes en el lago. Por el contrario, aumentos en especies como *Staurosira construens*, *Discostella stelligera* y *Nitzschia denticula* indicarían aguas ricas en nutrientes y un aumento de la productividad. El comportamiento del ensamble de diatomeas en relación a materia orgánica, nutrientes, sílice biogénica y pigmentos, permitió la reconstrucción del estado trófico de Laguna Espejo durante los últimos casi mil años.

ABSTRACT

Lake systems are affected by anthropogenic activities and natural phenomena. Through the study of sedimentary records (paleolimnology) we can determine past conditions and the effect of both events on water bodies. Laguna Espejo is a small lake located in Futaleufú town, southern Chile. A paleolimnological study has been carried out in this lake by analyzing physicochemical and diatomological records contained in a sedimentary profile extracted from the lake. For this study, the first 50 cm of the core were considered, representing approximately the last ~882 years. Magnetic susceptibility analyses showed a marked increase in the year 1840 AD, which is consistent with a decrease in organic matter, carbonates, nutrients and pigments, indicating the presence of volcanic material at this point. According to the diatomological composition, 4 zones were defined along the sedimentary profile, where it is possible to observe an increase in the relative abundance of *Staurosirella pinnata* and *Brachysira lilliana* species, which would indicate a low amount of nutrients in the lake. On the contrary, increases in species such as *Staurosira construens*, *Discostella stelligera* and *Nitzschia denticula* would indicate nutrient-rich waters and increased productivity. The behavior of the diatom assemblage in relation to organic matter, nutrients, biogenic silica and pigments, allowed the reconstruction of the trophic state of Laguna Espejo during the last thousand year.

1 INTRODUCCIÓN

Paleolimnología y ecosistemas lacustres

La paleolimnología es una ciencia multidisciplinaria que estudia, los sedimentos lacustres, con la finalidad de reconstruir condiciones pasadas y la variabilidad ambiental que ha tenido un lago y su cuenca en el pasado (Caballero, 2013).

Los ecosistemas lacustres están estrechamente conectados con el entorno que los rodea, por lo que son sensibles a los impactos y perturbaciones externas. Por una parte, los eventos naturales como movimientos telúricos, el ingreso de material piroclástico volcánico (tefra) durante una erupción volcánica por medio del aire, inundaciones o pérdida de vegetación por incendios movilizan y transportan sedimentos a la cuenca del lago (Richardson et al. 2018), generando cambios en las condiciones del ecosistema lacustre. Por otra parte, se encuentran las actividades antrópicas como el cambio de uso de suelo para agricultura, lo que conlleva un gran aporte de nutrientes a la tierra, debido al uso de fertilizantes, que posteriormente son arrastrados a diferentes cuerpos de agua, generando procesos de eutrofización (Wang et al., 2023). Actividades como la deforestación y la ganadería, generan un aumento de escorrentía y desestabilización de suelos (Martin et al., 2019), provocando un aumento en la cantidad de sedimentos que ingresan a la cuenca. Todas estas perturbaciones generan un impacto en los ecosistemas lacustres debido a los cambios que se producen tanto dentro como fuera del cuerpo de agua.

El conocer las condiciones ambientales pasadas de un cuerpo de agua, permite demostrar la degradación o recuperación de un ecosistema, además de determinar si las perturbaciones han tenido consecuencias negativas sobre el ecosistema, y conocer las trayectorias de cambio ambiental (Smol, 2009). Esta información nos permite establecer el alcance del impacto y la tasa de cambio ambiental que estos sistemas han experimentado a través del tiempo, a la vez que aportan información que permite predecir las condiciones ambientales futuras y así, realizar un mejor

manejo del medio ambiente para “mantener sus servicios ecosistémicos” (Douglas, 2013).

Para el estudio de las condiciones ambientales pasadas, los sedimentos lacustres son considerados como archivos ambientales, ya que, acumulan una gran cantidad de componentes biológicos, físicos y químicos como minerales, material biológico lacustre y terrestre, además de cenizas volcánicas (tefra) y precipitados químicos (Lirio, 2011), los cuales pueden ser recuperados, y nos permiten interpretar a partir de sus variaciones, las condiciones del cuerpo lacustre en el pasado (Douglas, 2013).

Sedimentos lacustres como registros paleoambientales

Los lagos forman una matriz sedimentaria mediante procesos de sedimentación, que consisten en el depósito de componentes físico-químicos y biológicos que provienen de la columna de agua y/o de la cuenca de drenaje (Hordeñana, 2016). De esta manera, la matriz sedimentaria estará compuesta por material autóctono, es decir, material que se originó en el mismo lago, y por material alóctono, que es el material aportado desde la cuenca de drenaje. De acuerdo con lo anterior, los sedimentos lacustres conservan evidencias o registros de la evolución del sistema lacustre, así como de su entorno (Caballero, 2013) (Figura 1).

En términos temporales, las escalas de tiempos en los sedimentos siguen la Ley de la Superposición, es decir, los sedimentos más antiguos estarán más profundos y los más recientes corresponderán a los más superficiales, generando un orden cronológico y almacenando información de hechos pasados, que permite reconstruir las condiciones pasadas de los sistemas acuáticos (García-Rodríguez, 2002).

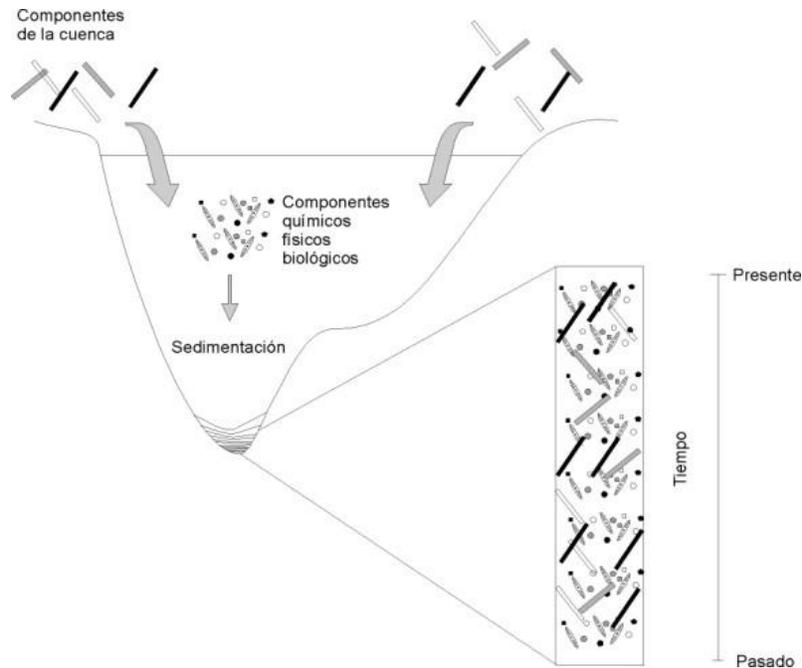


Figura 1. Representación esquemática del proceso de sedimentación en sistemas acuáticos. Extraído de García-Rodríguez 2002.

La información contenida en un perfil sedimentario se encuentra representada en diferentes parámetros, cada parámetro se define como proxy, los cuales permiten inferir diferentes características ambientales. La susceptibilidad magnética, los carbonatos y materia orgánica son parámetros físico-químicos que permiten la interpretación general del estado de un lago. Parámetros como la sílice biogénica, fósforo total, pigmentos y relación C/N, en conjunto con los parámetros mencionados anteriormente, permiten la interpretación de la productividad y el origen de la materia orgánica presente en el cuerpo de agua.

Por su parte, entre los registros sedimentarios biológicos, las diatomeas nos permiten inferir cambios ambientales como eutrofización, acidificación y variaciones climáticas, entre otros (Alvial et al., 2008).

Diatomeas y su uso como indicadores biológicos de condiciones pasadas

Las diatomeas son organismos fotosintéticos unicelulares (microalgas), destacadas como indicadores biológicos y son muy utilizadas en estudios paleolimnológicos, debido a su alta sensibilidad frente a variaciones en cuanto a nutrientes y pH (Cruces et al., 2001), además de tener un amplio rango de resistencia y de respuesta rápida a fluctuaciones ambientales (Narancic et al., 2021). Estas microalgas, presentan una pared celular silíceea denominada frústulo, que además de permitirle una conservación como microfósiles en sedimentos lacustres, permiten una identificación taxonómica a nivel de especie y subespecie, además las diatomeas se depositan de manera lenta y poco perturbada (Alvial et al., 2008) manteniendo integro el frústulo. Estas características posicionan a las diatomeas dentro de los principales paleoindicadores de cambios ambientales (Smol et al., 2005). De acuerdo a lo mencionado, el análisis de la estructura los ensambles de diatomeas se pueden relacionar con las condiciones tróficas históricas experimentadas por el cuerpo de agua.

Lagos Patagónicos

La Patagonia es un área interesante para estudios paleolimnológicos, ya que, alberga muchos ambientes acuáticos que, a su vez, están controlados por efectos climáticos regionales y locales (Guilizzoni et al., 2016). Es un lugar de amplio estudio de variabilidad paleoambiental, estos estudian los registros de cambios climáticos que ocurrieron después de la última glaciación, durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno (Massaferro, 2009). Sumado a esto, la mayor parte de los lagos patagónicos son de origen glacial, lo que les otorga continuidad en sus sedimentos a lo largo del tiempo, teniendo registro de eventos volcánicos, tectónicos y climáticos (Israde Alcántara et al., 2010). Los lagos patagónicos fueron áreas prístinas por mucho tiempo, con mucha vida silvestre y aguas libres de contaminación (Araneda et al., 2013), pero durante el siglo pasado comenzaron las actividades humanas, por lo que estos lagos patagónicos permitirían realizar una comparación entre las

condiciones naturales del ecosistema y las condiciones generadas por efecto de actividades antrópicas.

Ecosistema lacustre y productividad

Un lago, es un ecosistema que está influenciado por diversos factores ambientales, tales como la intensidad de la radiación lumínica, disponibilidad de nutrientes, transparencia y mezcla del agua (Cony et al., 2016), que en su conjunto determinarán la productividad de este (Klugh, 1926). Dentro de estos ecosistemas, es importante el estudio de producción primaria, ya que, constituyen la producción de material orgánico en la primera parte de la red trófica y debido a esto los productores primarios del fitoplancton, como las diatomeas, son los primeros en reflejar cambios en el ecosistema (Cony et al., 2016).

El estado trófico de los cuerpos de agua, además de estar relacionado con factores bióticos y abióticos del ecosistema, también puede verse fuertemente influenciado por las actividades antrópicas. La trofía de los lagos se determina mediante índices que describen el grado de eutrofización, de acuerdo con esto los lagos pueden tener un estado oligotrófico, mesotrófico o eutróficos. Según Carlson (1977), el estado trófico de un cuerpo de agua se determina a partir de una serie de criterios, entre ellos el oxígeno disuelto, composición de especies de fauna del fondo lacustre y fitoplancton, concentración de nutrientes y diversas medidas de biomasa y productividad, como los pigmentos. La variación en el estado trófico de los lagos conlleva cambios en la composición específica de las comunidades que lo habitan, de modo que un aumento en la productividad generará un incremento de los productores primarios, principalmente de las poblaciones fitoplanctónicas (Cony et al., 2014) que están presentes en los cuerpos de agua.

La eutrofización es el estado más productivo de un lago, debido a un enriquecimiento de nutrientes que genera un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, lo que a su vez genera la reducción de la penetración de la luz en el lago, además de reducir los niveles de oxígeno. Desde principios del siglo XX

se han registrado las consecuencias de la eutrofización de los cuerpos de agua, entre ellas la muerte de peces y reducción de la diversidad biológica además de la proliferación de algas nocivas (Arnold et al., 2019). Si bien se sabe que la eutrofización es un proceso natural, este puede ser acelerado por actividades antrópicas, siendo el incremento de la carga de fósforo la causa más importante (Gabito Velázquez, 2010; Wetzel, 1983).

De acuerdo con todo lo planteado anteriormente, el objetivo de la presente investigación es establecer a través de análisis de registros sedimentarios, cambios en las condiciones tróficas de Laguna Espejo (Patagonia Chilena).

2 HIPÓTESIS

Dado que la cuenca donde se ubica Laguna Espejo (Patagonia Chilena) experimentó una mayor intervención antrópica durante el último siglo, entonces los registros sedimentarios evidenciarán un aumento de la productividad durante este período de tiempo, con respecto a la productividad del lago previa a la antropización.

3 OBJETIVO GENERAL

Establecer a través de análisis de registros sedimentarios, cambios en las condiciones tróficas de Laguna Espejo (Patagonia chilena).

4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Reconstruir las comunidades de diatomeas en los estratos sedimentarios analizados de Laguna Espejo.
2. Determinar variaciones en los registros físico-químicos y biológicos en el perfil sedimentario de Laguna Espejo.
3. Relacionar las variaciones de los registros sedimentarios analizados con cambios en la productividad y trofía del Laguna Espejo.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el cuerpo de agua Laguna Espejo ubicada dentro de la comuna de Futaleufú, en la X región de Los Lagos, dentro de la provincia de Palena, 12 km al oeste de la frontera con Argentina, en las coordenadas 43°11'09,45''S y 71°51'31.72''O.

Se encuentra a una elevación de 347m.s.n.m con un área superficial de 0.11km² aproximadamente. La red hidrográfica de Laguna espejo se encuentra alimentada por el río Espolón y por el río Futaleufú, que son los cursos de agua más aledaños al área de estudio. Al no haber presencia de alimentación directa hacia el lago, se infiere que es alimentado por aguas subterráneas y precipitaciones.

La vegetación que rodea a Laguna Espejo desde el Holoceno, consiste en bosques dominantes de *Nothofagus* con una variación en composición y estructura hasta presentarse como el actual (Jara et al., 2019), compuesta por el Bosque Caducifolio de Aysén y el Bosque Siempreverde Montano según Gajardo (1994).

Futaleufú, se encuentra ubicado en el medio de la cordillera de los Andes a 10 km de la frontera con Argentina. Esta localidad comenzó a ser habitada desde 1920, pero fue fundada en abril de 1929 por colonos provenientes de Argentina que cruzaron a través del valle. Esta comuna al ser fronteriza es una parada común para los turistas que cruzan desde o hacia el país vecino, además, se caracteriza por ser un atractivo para los turísticos debido al claro reflejo de sus aguas y ha sido también utilizada para dar paseos en bote y bicicletas acuáticas. Para los habitantes de esta comuna, el turismo es el principal ingreso económico (Vallejos 2017), también la ganadería y los productos forestales.

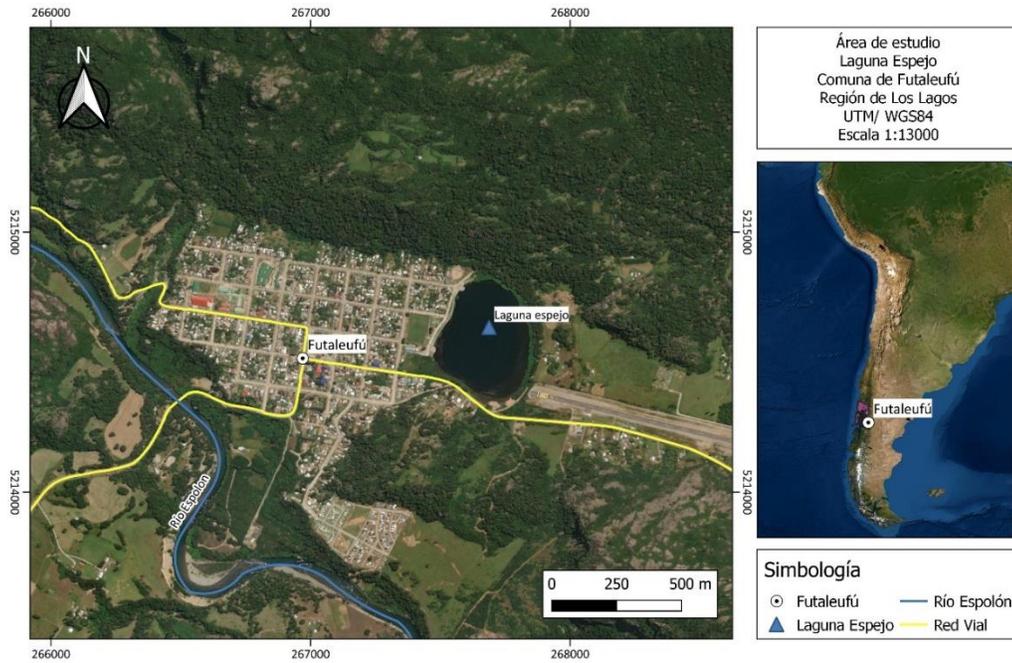


Figura 2. Ubicación de Laguna Espejo.

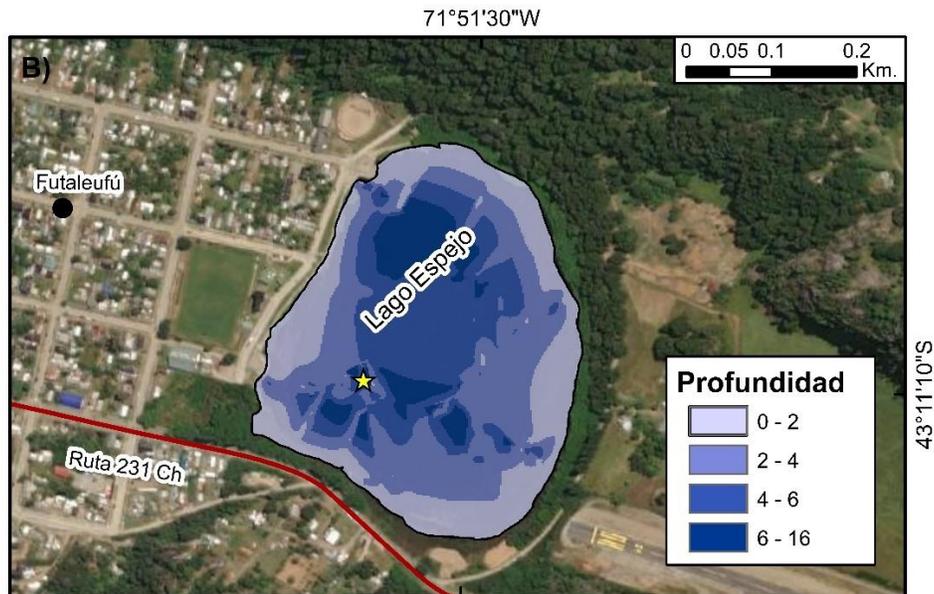


Figura 3. Batimetría de Laguna Espejo.

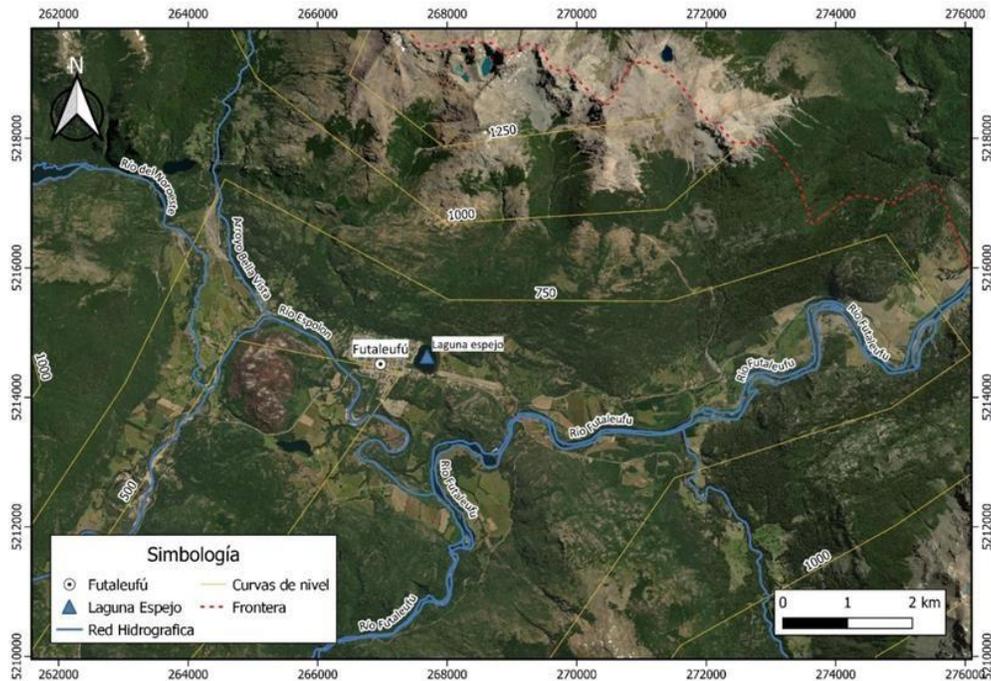


Figura 4. Red hidrográfica de Laguna Espejo.

Laguna Espejo, es de cuenca cerrada y con registro ininterrumpido durante los últimos ~15.400 años (Jara et al., 2019) siendo un lago ideal para reconstruir los impactos antrópicos, debido a su registro ininterrumpido y su cercanía espacial con el asentamiento humano. El valle de Futaleufú comenzó a ser habitado por colonos provenientes de Argentina en 1912, los cuales cruzaron la frontera y deforestaron terrenos para habitar, comenzaron desarrollando actividades de agricultura, sembrando papas, trigos, y cereales, con el paso del tiempo se introdujo la ganadería como fuente de ingresos, los pobladores criaban vacunos y ovinos, los cuales vendían en Argentina (CIREN, 2021). Siendo estas las primeras actividades antrópicas que impactaron el cuerpo de agua.

5.2 Obtención de material sedimentario

El material sedimentario utilizado en esta investigación corresponde a 2 perfiles sedimentarios, extraídos por el personal del Laboratorio de sedimentología del Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE en Junio de 2021 y en Enero del 2022. Para esto se utilizó un muestreador de gravedad UWITEC que colecta una porción de sedimento del fondo del llago en la zona más profunda, el que se almacenó en frío hasta el momento de su utilización. Posteriormente se realizó una inspección de la secuencia estratigráfica con toma de rayos X (Smol et al., 2002).

Finalmente, se realizó el seccionamiento del perfil de acuerdo con la estratigrafía evidenciada en el sedimento y los objetivos planteados, que para el presente trabajo los cortes fueron realizados cada 0,5 cm durante los primeros 20 cm del perfil y en los centímetros posteriores se realizaron cada 1cm hasta la mayor profundidad.



Figura 5. Radiografía y fotografía de testigo de Laguna Espejo Esp21-B (130 cm).

5.3 Geocronología de los sedimentos.

En los estudios paleolimnológicos es fundamental contar con una geocronología precisa del material sedimentario, y así establecer el período de tiempo en el que ocurrieron los cambios ambientales. La geocronología determina de manera cuantitativa la distribución vertical de los radioisótopos en el perfil sedimentario (Hordeñana, 2016). Para esto se utilizan técnicas de datación basadas en radioisótopos y se aplican de acuerdo con el periodo que se necesita abarcar. En muestras sedimentarias en las que se busca abarcar una corta duración temporal se utiliza el radioisótopo ^{210}Pb (origen natural) y ^{137}Cs producido por la industria nuclear en la década de 1950 (Escobar et al., 2005). El período de semidesintegración del ^{210}Pb es de 22,3 años y del ^{137}Cs es de 30 años (El-Daoushy, 1988; Escobar et al., 2005) lo que los hacen especialmente adecuados para fechar sedimentos depositados durante los últimos siglos (Crickmore et al., 1990), generando cronologías confiables para los últimos 100-150 años. Para secciones de sedimento más antiguas, se utiliza la metodología de Carbono-14 donde se mide la cantidad residual del isótopo que ha quedado en algún resto orgánico, y se determina el tiempo transcurrido desde que cesó el intercambio con el entorno (Mari et al., 2017).

Para la presente investigación la geocronología se realizó con un modelo de edad basado en la tefroconología descrita en la publicación de Jara et al. 2019. En la cual se determinó el origen de material piroclástico (tefra) en el perfil sedimentario y se correlacionaron con eventos volcánicos ocurridos en la zona.

5.4 Ensamble diatomológico

Las diatomeas presentan como característica principal una pared silíceas que las mantiene integras en los sedimentos lacustres. El frústulo de estas microalgas posee diversas formas y ornamentaciones, que permiten una certera identificación. La diversidad y abundancia relativa de las diatomeas a lo largo de un perfil sedimentario, indican cambios en las condiciones ambientales del sistema acuático, estas condiciones pueden ser pH, temperatura, salinidad, conductividad, profundidad de la columna, presencia/ausencia de nutrientes, carbono orgánico total, contaminación o estado trófico (Alefs & Müller, 1999; Dixit & Smol, 1995; Wessels et al., 1999; Zeeb et al., 1994). Además, poseen una alta tasa de crecimiento, por lo que responden rápidamente a los cambios ambientales que ocurren durante la eutrofización o la rehabilitación de un lago (Gabito Velázquez, 2010; Stoermer & Smol, 1999). Esta sensibilidad a los cambios y su forma de vida cosmopolita las hace excelentes indicadores de condiciones ambientales y paleoambientales.

Para la visualización e identificación de diatomeas es necesario eliminar por completo la materia orgánica presente en el sedimento, debido a que la presencia de esta, oculta las estructuras del frústulo y por ende, no es posible realizar una clara observación que permita identificar géneros y especies de diatomeas.

Para la oxidación de materia orgánica se utilizó en primera instancia la metodología descrita por Hasle and Fryxell (1970).

Además, se realizó un segundo proceso de oxidación utilizando la metodología de Battarbee et al. (2001), debido a que las muestras continuaban con materia orgánica después de haber pasado por el primer proceso de oxidación, además también se observaron carbonatos. Para esto se realizó la eliminación de carbonatos utilizando 1ml de HCl 10% durante 30 minutos a baño maría a 70°C.

Una vez eliminada la materia orgánica, las muestras fueron fijadas con resina Naphrax.

Posteriormente se procedió a la identificación de diatomeas, para lo cual se observaron bajo microscopía óptica y electrónica, para la determinación de las especies se utilizaron libros (Hofmann et al., 2011) y manuales (Lavoie & Hamilton, 2008; Prygiel & Coste, 2000; Rivera et al., 1982) en los cuales se detallan las características y ornamentaciones del frústulo de cada diatomea. Se contabilizaron un mínimo de 300 valvas por cada centímetro o estrato de sedimento. Con esta información se calcularon las abundancias relativas de las especies.

5.5 Análisis sedimentológico

5.5.1 Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica de los sedimentos se determinó mediante la técnica de pérdida de peso por ignición (LOI: Loss On Ignition), que consiste en medir el peso de la muestra después de su calcinación a 105°C por dos horas y 550°C por cuatro horas, para posteriormente utilizar estos valores según la ecuación de (Boyle, 2002)(Ecuación 1).

$$\text{LOI 550(\%)} = (\text{PS60} - \text{PS 550} / \text{PS60}) 100$$

(Ecuación 1)

Donde: LOI550 (%) = Porcentaje de materia orgánica en el sedimento; PS60 = Peso seco de la submuestra luego de ser secada a 60°C y antes de la combustión y PS550 = Peso seco de la submuestra de la combustión a 550°C.

5.5.2 Contenido de carbonatos

Se determinó el contenido de carbonato en los estratos sedimentarios (carbono inorgánico) mediante la calcinación del sedimento a 950°C siguiendo los métodos de (Boyle, 2002)(ecuación 2).

$$\text{LOI 950(\%)} = (\text{PS550} - \text{PS950} / \text{PS60}) 100$$

(Ecuación 2)

5.5.3 Susceptibilidad magnética

Las mediciones de susceptibilidad magnética se realizaron utilizando un Sensor Bartington® MS2E sobre los testigos de sedimento después de ser cortados longitudinalmente. De esta forma se determinó la concentración de minerales magnéticos a lo largo de ambos testigos sedimentarios.

5.5.4 Fósforo

Para la determinación de fósforo total en sedimento se utilizó la metodología de Jackson 1964.

5.5.5 Relación Carbono/Nitrógeno

Para la determinación de esta relación, las muestras fueron analizadas tanto para el contenido de carbono orgánico como para el de nitrógeno orgánico.

Para este análisis, las muestras de sedimento se sometieron a una fumigación ácida (HCl por 6 horas) para obtener las abundancias de Carbono Orgánico (Corg) y Nitrógeno Orgánico (Norg) y así eliminar carbonatos. Este procedimiento fue realizado por el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales (LISAB) de la Universidad de Concepción.

5.5.6 Sílice biogénica

La extracción de sílice biogénica se realizó siguiendo la metodología de (Mortlock & Froelich, 1989) incorporando algunas modificaciones referidas principalmente a revoluciones en los ciclos de centrifugación y concentraciones de reactivos.

5.5.7 Pigmentos

El análisis de clorofila-a se realizó utilizando acetona al 90% como solvente, mediante espectrofotometría. Luego de determinar la concentración de clorofilas se utilizarán las ecuaciones de Wegmann y Metzner (1971), sin embargo, previo a incorporar las absorbancias (abs) a las fórmulas se deben tener las absorbancias corregidas (Ac):

$$Ac\ 663\ nm = abs\ 663\ nm - abs\ 750\ nm$$

$$Ac\ 644\ nm = abs\ 644\ nm - abs\ 750\ nm$$

Posteriormente se calcularon las concentraciones relativas (Cr) de clorofila "a" y clorofila "b" utilizando las siguientes formulas

$$Cr\ clorofila\ a = 10.3 * Ac\ 663 - 0.918 * Ac\ 644$$

$$Cr\ clorofila\ b = 19.7 * Ac\ 644 - 3.87 * Ac\ 663$$

Finalmente se determinó la concentración de pigmentos en $\mu\text{g/L}$ de cultivo relacionando el volumen total del extracto y volumen de cultivo (expresado en litros):

$$Clorofila\ (\mu\text{g}/\text{mg}) = Cr\ Clorofila * v/Bs * z$$

En donde Cr corresponde a la concentración relativa. Z al camino óptico de la cubeta (1cm). V al volumen del extracto de pigmentos en ml (10 o 25ml, según corresponda). Y Bs será la biomasa seca a partir de la cual se extrajo (mg).

5.6 Análisis de resultados

Para la evaluación de la estructura de las especies de diatomeas a lo largo del perfil sedimentario se utilizó el programa R Studio (RCoreTeam, 2020).

Para el análisis se consideraron aquellas especies que tuvieran una abundancia >2% en al menos una muestra y se realizó un análisis de agrupamiento mediante el método CONISS para determinar las zonas presentes en el perfil sedimentario. Para la determinación de la significancia de este análisis, se realizó un análisis Broken stick.

Con la matriz de datos de diatomeas se realizó un análisis exploratorio DCA para determinar la distribución del ensamble. De acuerdo con el largo de los gradientes se determinó un valor inferior a 3 por lo que finalmente se realizó un análisis multivariado RDA y se evaluó la significancia de este a través del test de Monte Carlos.

6 RESULTADOS

6.1 Geocronología de los sedimentos

Se identificaron 4 capas de tefras correspondientes al volcán Chaitén y Michinmahuida. La descripción de estas está detallada en la tabla 1.

Código	Prof. (cm)	Espesor (mm)	Características			Fuente	Origen volcánico
			Color	SM	MO		
TES-01	0.5	1.5	B	48.6	3.6	FU1(Daga et al 2016)	Chaitén
TES-02	14	2	N	548	1.8	LET1 (Jara et al 2019)	Chaitén/Michinmahuida
TES-03	22	1	B	52	17		Chaitén
TES-04	59	1	N	102	18.7	LET3 (Jara et al 2019)	Chaitén

Tabla 1. Descripción de tefras presentes en sedimento de lago Espejo.

6.1.1 Modelo cronológico

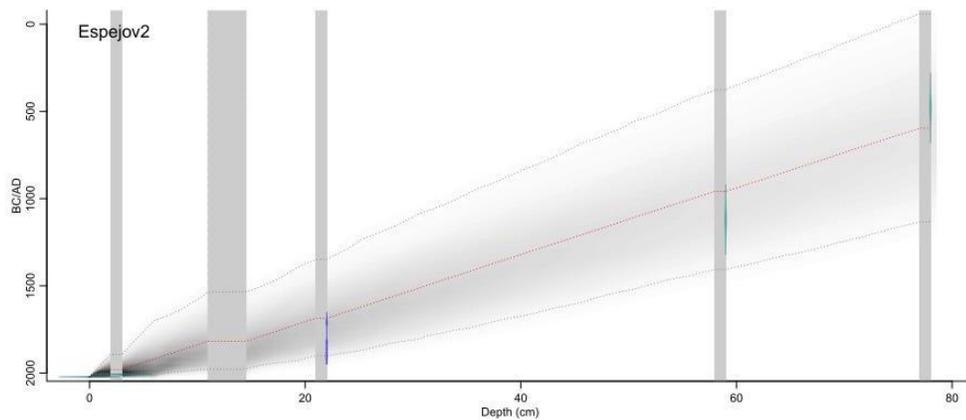


Figura 6. Modelo cronológico de lago Espejo utilizando tefras TES-01, TES-02, TES-03 y TES-04, realizado con rbacon 0.2.2 en Rstudio.

El modelo de edad sugiere que en los 50 cm que abarca esta investigación se estarían analizando los últimos ~882 años (2022 - 1140 AD).

6.2 Ensamble diatomológico

En los 50 centímetros de sedimentos analizados se contabilizaron un total de 38 taxas de diatomeas. Dentro del análisis se consideraron 22 especies, las cuales presentaban una abundancia >2% en al menos una muestra, siendo *Achnanthis minutissimum*, *Encyonopsis cesatii*, *Discostella glomerata*, *Discostella stelligera* y *Stephanocyclus meneghiniana* las especies con mayor abundancia relativa. En la figura 7 se presentan imágenes de las especies más abundantes.

De acuerdo con la presencia de diatomeas en cada centímetro del estrato, se definieron 4 zonas mediante el análisis de CONISS, donde se define la zona I desde el centímetro 50 - 42 (1140-1302 AD), la zona II desde el centímetro 42-13(1302-1840 AD), la zona III desde el cm 13-2(1840-1989 AD) y la zona IV con los centímetros 2-0 (1989-2022 AD) (Figura 8).

Zona I (50 – 42cm; 1140 – 1302 AD)

Durante el inicio de esta zona *Discostella glomerata* y *Discostella stelligera* comienzan con una abundancia >30% y se mantienen altas y constantes las abundancias hasta 1302 AD donde tiene a la disminución hasta finalizar la zona. En esta zona se observa el único aumento de *Sellaphora pupula* (7,2%) en 1302 AD *Staurosira construens* tiene una abundancia baja la cual disminuye hasta 0,86% en 1302 AD donde comienza a aumentar llegando a su abundancia máxima (32,9%) en 1362 AD *Staurosirella neopinnata* aumenta al final de la zona. *Aulacoseira granulata* y *Aulacoseira pusilla* están presentes en esta zona en bajas abundancias, desapareciendo para el final de la zona. En el año 1480 AD *Synedra* tiene la mayor abundancia (2,2%), esta disminuye hacia el final de la zona.

Zona II (42 – 13 cm; 1302 – 1840 AD)

Esta zona es la más extensa del perfil sedimentario, *D. stelligera* predomina el ensamble, junto con *D. glomerata*, ambas especies comienzan aumentando su

abundancia, luego tienden a disminuir en 1747 AD. y finalmente aumentan hasta 1787 AD. Si bien *Achnantheidium minutissimum* no tiene una abundancia predominante, mantiene el mismo comportamiento de las dos especies mencionadas anteriormente, aumentando al final de la zona. La especie *Brachysira liliiana* tiene un peak en 1707 AD alcanzando una abundancia relativa de 15,1%. En el año 1829 AD se observa el única gran aumento de *Nitzschia* sp.

S. construens disminuye su abundancia hasta 1707 AD donde tiene un gran aumento (23,9%). *Staurosirella pinnata* comienza a aumentar desde 1424 AD mostrando el mismo peak de *S. construens*. *S. neopinnata* mantiene la abundancia que alcanzó en la zona I y también aumenta, al igual que las especies mencionadas anteriormente con una abundancia máxima de 21,3%. Luego de este momento las tres especies disminuyen sus abundancias. *Stephanocyclus meneghiniana* empieza a aumentar su abundancia en 1508 AD.

Zona III (13 – 2 cm; 1840 – 1989 AD)

Al inicio de esta zona se observa un aumento de *S. neopinnata*, *S. construens* y *S. pinnata*, el que se mantiene durante gran parte de la zona, pero disminuye en 1989 AD. *A. minutissimum* tiene su mayor abundancia al final de esta zona 19,4% en 1989. *S. meneghiniana* tiene una leve baja y continúa aumentando, alcanzando su máxima abundancia (10,4%) en 1973 AD, al igual que *Encynopsis cesatii* (9,2%). En 1878 AD *A. pusilla* muestra un incremento hasta 1898 AD. Por otra parte, *D. stelligera* comienza a disminuir desde 1840 AD al igual de *D. glomerata*. *A. granulata* tiene un aumento en 2014 AD hasta 1989 AD (5,8%).

Zona IV (2 – 0 cm; 1989 – 2022 AD)

En esta zona *Cyclotella distinguenda*, *Synedra* sp. y *Tabellaria flocculosa*, presentan su mayor abundancia relativa, siendo *C. distinguenda* predominante con una abundancia máxima de 50,7% en 2014 AD. Taxas como *D. stelligera* y *S. construens* tienen su menor abundancia. Al inicio de esta zona, en el año 1989 AD,

se observa un aumento de *A. minutissimum* y *S. meneghiniana*, y a su vez una disminución de *C. distinguenda*. Por su parte, *A. granulata* disminuye hasta 2022 AD.

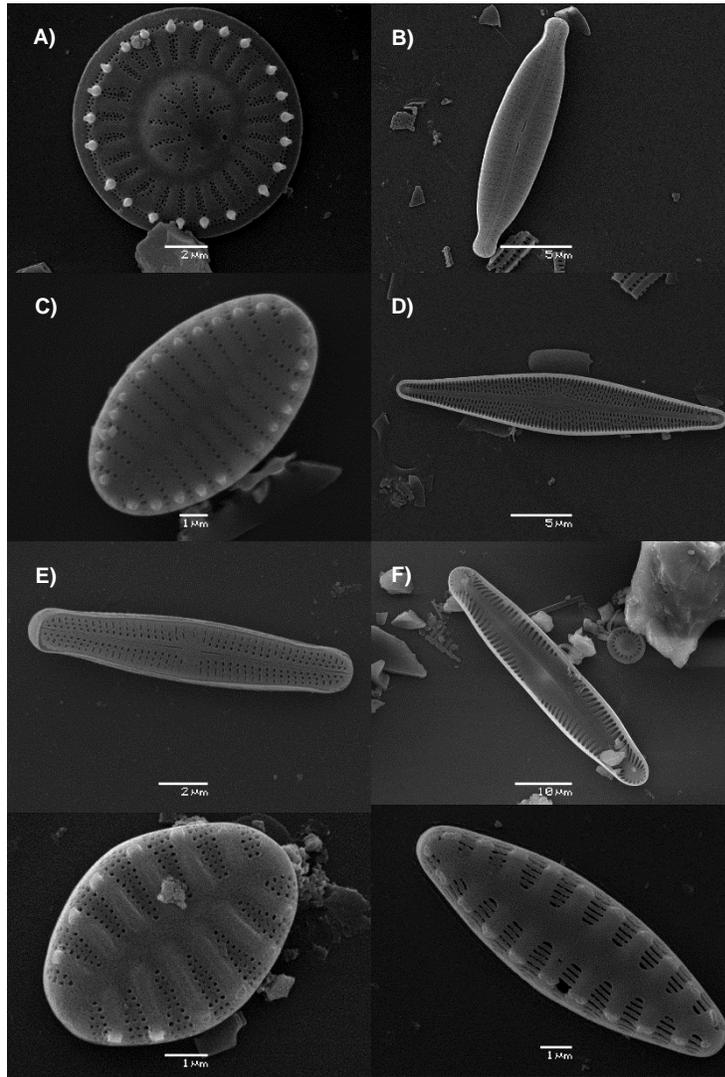


Figura 7. Diatomeas sedimentarias de Laguna Espejo. (A) *Discostella stelligera* (B) *Encyonopsis cesatii* (C) *Staurosira construens* (D) *Brachysira liliana* (E) *Achnantheidium minutissimum* (F) *Pinnularia brebissonii* (G) *Staurosirella neopinnata* (H) *Staurosirella pinnata*.

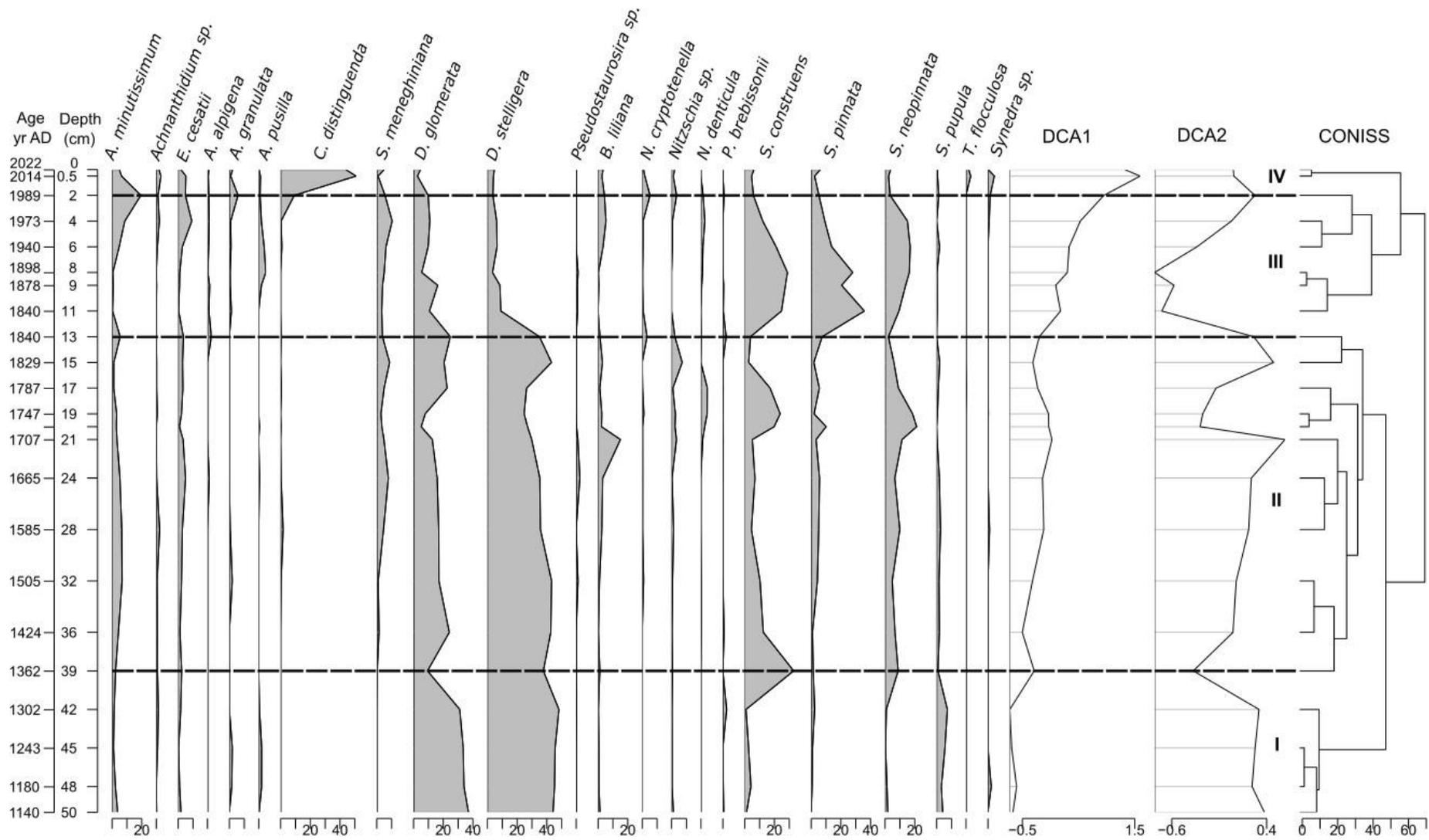


Figura 8. Diagrama estratigráfico de abundancias relativas de diatomeas sedimentarias de Laguna Espejo (>2%). Análisis DCA y análisis de agrupamiento mediante el método CONISS

6.3 Análisis sedimentológico

Presentación de la tendencia de datos físico-químicos del perfil sedimentario de Laguna Espejo.

Parámetros	Mínima	Máxima	Media	Mediana
Susceptibilidad magnética	3,13	567,57	54,06	22,9
Carbonatos	-0,033	2,46	1,35	1,36
Materia Orgánica	1,80	39,19	17,30	19,69
Fósforo	13	859,24	470,79	533,02
C/N	6,88	10,66	8,10	8,02
Sílice Biogénica	0,45	2,87	1,21	1,08

Tabla 2. Detalle del comportamiento de los datos: mínima, máxima, media y mediana.

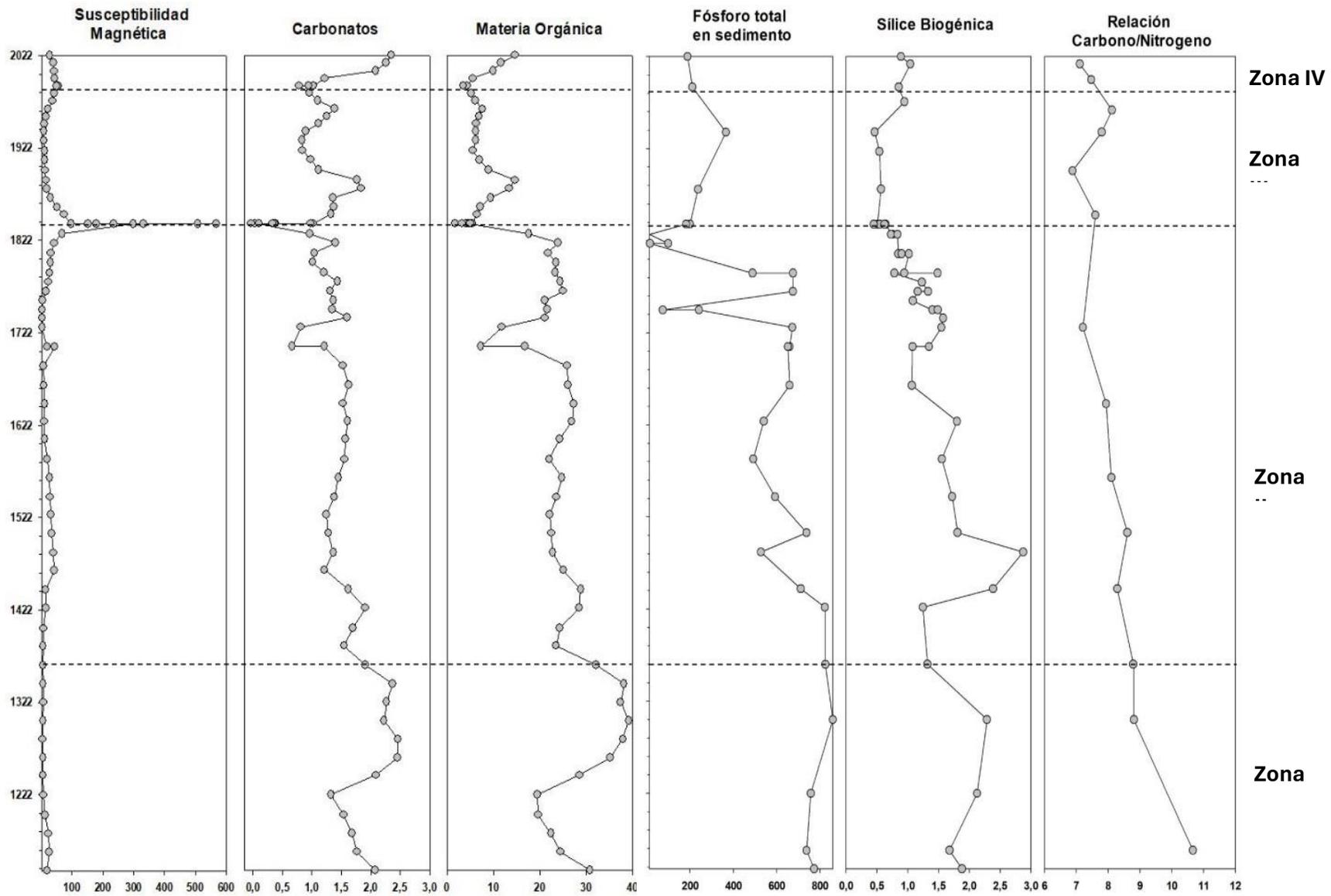


Figura 9. Perfil estratigráfico de parámetros físico-químicos de Laguna Espejo. Se indica en línea punteada la división de las zonas según análisis de agrupamiento CONISS.

Zona I (50 – 42 cm; 1140 – 1302 AD)

En esta zona la susceptibilidad magnética (SM) presenta una disminución que la mantiene en valores muy bajos. Los carbonatos (C) y la materia orgánica (MO) presentan una disminución constante hasta 1222 AD. Por otra parte, el fósforo (P) y la sílice biogénica (SiB) tiene una leve baja y empiezan a aumentar en 1158 AD. La relación carbono/nitrógeno (C/N) disminuye desde el inicio hasta el final de la zona.

Zona II (42 – 13 cm; 1302 – 1840 AD)

Durante esta extensa zona la MO y los C tienen una disminución entre 1902 AD y 1707 AD donde tienen una marcada baja que coincide con un pequeño aumento de SM, luego aumentan hasta 1840 AD donde tienen la mayor baja y alcanzan sus valores mínimos, esta disminución ocurre en el mismo momento en que la susceptibilidad magnética alcanza su máximo valor. En cuanto al fósforo total tiene un comportamiento muy similar, respondiendo con bajas a las alzas de SM. La sílice biogénica muestra un alza en 1485 AD que se ve también en el P. La relación C/N mantiene su tendencia a la disminución de inicio a fin de la zona II.

Zona III (13 – 2 cm; 1840 – 1989 AD)

Luego del aumento de la SM, al final de la zona II, en el inicio de esta zona disminuye hasta valores muy bajos, teniendo un leve aumento en 1989 AD. Por otro lado, la MO y los C comienzan a aumentar hasta llegar a un pequeño peak en 1965 AD para posteriormente disminuir gradualmente hasta 1989 AD, donde nuevamente disminuye en el punto donde la SM aumenta. En esta zona la relación C/N comienza con una baja, pero en 1900 AD aumenta hasta 1965 AD donde vuelve a disminuir. El fósforo total mantiene un aumento desde el inicio de

la zona hasta 1940 AD donde comienza a disminuir. La SiB por su parte se mantiene constante hasta 1940 AD donde aumenta hasta 1973 AD donde disminuye levemente.

Zona IV (2 – 0 cm; 1989 – 2022 AD)

La relación C/N muestra una disminución en esta zona. El fósforo total se mantiene con una leve disminución. La sílice biogénica muestra un aumento hasta 2014 AD y finalmente disminuye hasta 2022 AD. La SM tiene un muy leve disminución hasta 2022 AD. Finalmente la materia orgánica y los carbonatos aumentan durante toda la zona hasta el último tiempo del perfil sedimentario.

6.3.1 Pigmentos

Presentación de la tendencia de pigmentos en el perfil sedimentario de Laguna Espejo.

Parámetros	Mínima	Máxima	Media	Mediana
Clorofila-a	0	0,32	0,16	0,13
Clorofila-b	0	0,93	0,42	0,34
Diatoxantina	-0,08	0,45	0,29	0,33
Carotenos	0	0,47	0,33	0,37

Tabla 3. Detalle del comportamiento de los datos: Clorofila-a, Clorofila-b, Diatoxantina y Carotenoides.

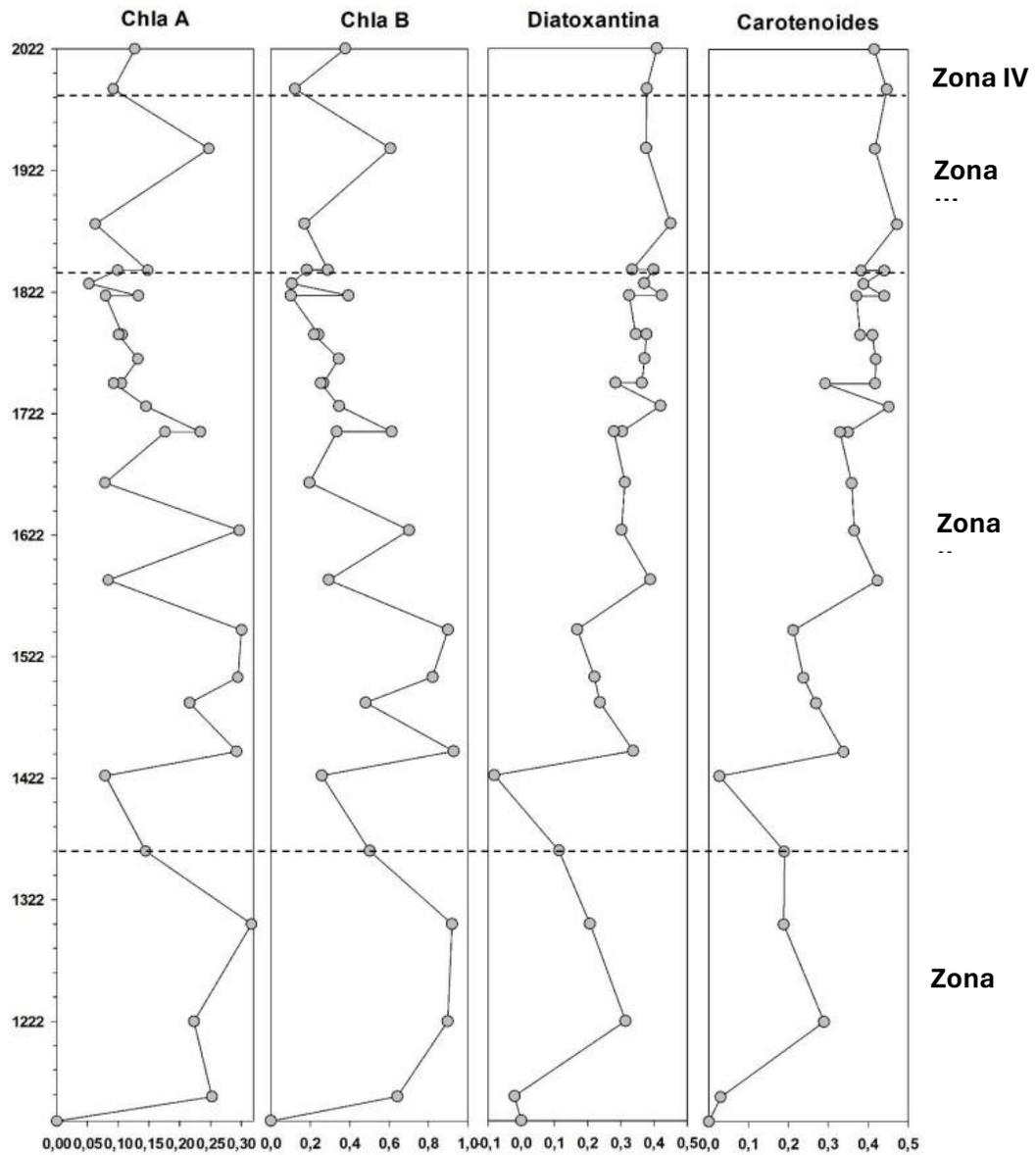


Figura 10. Perfil estratigráfico de pigmentos. Se indica en línea punteada la división de las zonas según análisis de agrupamiento CONISS.

Zona I (50 – 42 cm; 1140 – 1302 AD)

Todos los pigmentos comienzan esta zona desde valores muy cercanos al 0. La clorofila-a aumenta hasta 1160 AD donde disminuye hasta 1222 AD, para volver a aumentar hasta el final de la zona. La clorofila-b aumenta desde el inicio hasta el fin de la zona. La diatoxantina disminuye levemente hasta 1160 AD y comienza a aumentar hasta 1222 AD donde vuelve a disminuir hasta 1302 AD. Los carotenos aumentan hasta 1222 AD y disminuyen al igual que la diatoxantina.

Zona II (42 – 13 cm; 1302 – 1840 AD)

Clorofila-a, clorofila-b y diatoxantina disminuyen desde el inicio de la zona hasta 1424 AD. Carotenoides se mantiene hasta 1362 AD y disminuye igual que los demás pigmentos. Posterior a este tiempo, clorofila-a y b tienen un comportamiento similar que tiende a la baja hasta el final de la zona. Por el contrario diatoxantina y carotenoides mantienen la misma tendencia al aumento para el final de la zona.

Zona III (13 – 2 cm; 1840 – 1989 AD)

Durante esta zona el comportamiento de las clorofilas es similar entre ellas y comienza con una baja hasta 1878 AD, luego aumenta hasta 1940 AD donde comienza a disminuir hasta el final de la zona en 1989 AD. La diatoxantina y los carotenoides también tienen un comportamiento similar, pero contrario a las clorofilas, por lo que comienza aumentando, disminuye desde 1878 AD y termina aumentando al final de la zona.

Zona IV (2 – 0 cm; 1989 – 2022 AD)

Para esta última zona clorofila-a, clorofila-b y diatoxantina aumentan hasta 2022 AD, mientras que carotenoides disminuye.

6.4 Análisis multivariado

De acuerdo con el resultado de DCA inferior a 3, teniendo el eje 1 un valor de 2,3 y el eje 2 un valor de 1,4, se realizó un análisis de redundancia (RDA).

El RDA resultó explicativo en un 40,3%, donde el primer eje explica un 25,5% de la variación de los datos y el segundo eje explica un 14,8%. Además de esto se realizó un test de significancia del modelo en el cual resultó un p-value= 0,001, siendo significativo.

La variable más influyente para el ensamble de diatomeas fue la materia orgánica (MO), la diatoxantina también muestra una gran influencia en las especies. Si bien la susceptibilidad magnética no es tan influyente, si es la variable que explica la mayor cantidad de especies dentro del modelo.

Discostella stelligera es la especie con una mayor relación con la materia orgánica, *Sellaphora pupula* también se relaciona directamente con la MO y por ende tienen una relación inversa con la susceptibilidad magnética. Lo mismo ocurre con *Achnanthydium* sp.

Achnanthydium minutissimum muestra una relación directa con la susceptibilidad magnética, al igual que la mayoría de las especies presentes en el modelo como *Encynopsis cesatii*, *Nitzschia denticula*, *Staurosira construens*, *Aulacoseira granutala*, entre otras.

Por otra parte, *Staurosirella pinnata* es la especie con mayor relación con diatoxantina, al igual que *Cyclotella distinguenda*, *Stephanocyclus meneghiniana* y *Staurosirella neopinnata*.

Aquellos géneros que se encuentran en el centro del gráfico presentan un comportamiento neutro a las variables ambientales presentes en el modelo. Finalmente, especies como *Discostella glomerata* y *Pinnularia brebersonii* se deduce que tienen una relación contraria con la diatoxantina.

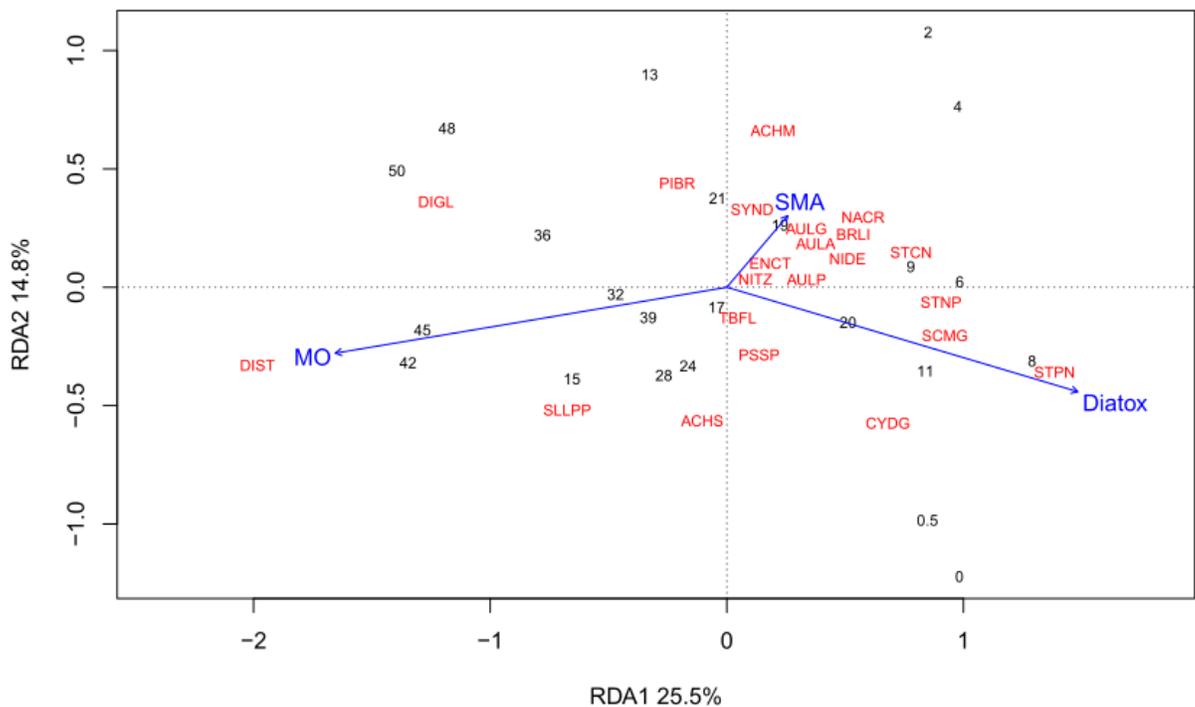


Figura 11. RDA-triplot de sitios (negro), variables ambientales (azul) y diatomeas (rojo), basadas en los dos ejes (SMA: Susceptibilidad magnética, MO: Materia orgánica, Diatox: Diatoxantina).

7 DISCUSIÓN

Zona I (50 – 42 cm; 1140 – 1302 AD)

Sellaphora pupula muestra una abundancia máxima en esta zona, lo que indicaría un ambiente mesotrófico, estando asociado a un débil aumento de la productividad (Cartier et al., 2015), lo que se relaciona a su vez con aumento de nutrientes como el fósforo que también muestra un aumento al final de esta zona.

Staurosira construens está descrita como una especie eutrófica/hipereutrófica común en ambientes perturbados (Fontana et al., 2019). La cual es ampliamente adaptativa (McGlynn et al., 2010) y presenta una amplia tolerancia a casi todos los factores ambientales (Ponader & Potapova, 2007). Por lo que, el aumento de abundancia de esta especie al final de esta zona relacionado con el aumento de materia orgánica estaría indicando un incremento en los nutrientes. Por su parte, *Staurosirella pinnata* al ser una especie de condiciones oligotróficas y aguas bien oxigenadas, presenta una baja abundancia durante esta misma zona.

Discostella stelligera se encuentra en ambientes cálidos y *Cyclotella distinguenda* en ambientes fríos, por lo que la ausencia de *C. distinguenda* en este periodo se podría deber un aumento de la temperatura del ambiente. La presencia de *D. stelligera* es un indicador de aumento de nutrientes, lo cual tiene sentido con su aumento durante esta zona, pero la disminución de esta especie desde ~1320 AD no se relaciona con una disminución de nutrientes, sino que con una disminución de la productividad microalgal del lago, por la disminución simultánea de las clorofilas y la sílice biogénica. La alta abundancia relativa de *D. stelligera* y *D. glomerata* indicarían condiciones ricas en nutrientes.

Staurosirella neopinnata es una especie ticoplanctónica, aumenta para el final de esta zona. Esta especie podría verse favorecida por condiciones frías del lago y por altas condiciones tróficas (Cantonati et al., 2021), por lo que, se podría

relacionar con la disminución de *D. stelligera*, que se desarrolla mejor en temperaturas cálidas.

Zona II (42 – 13 cm; 1302 – 1840 AD)

En el inicio de la zona *D. stelligera* y *D. glomerata*, vuelven a aumentar su abundancia indicando ambiente rico en nutrientes, lo cual se condice con el aumento de *Achnanthydium minutissimum*. Estas especies a pesar de tener un aumento al inicio de la zona, tienden a la disminución para el final de la zona, mostrando cambios en las condiciones tróficas del lago.

Por su parte *S. construens* y *S. neopinnata* disminuyen y aumenta *S. pinnata*, marcando una disminución de la productividad del lago en conjunto con la disminución de todos los pigmentos, MO, C y sílice biogénica. Relacionado a un aumento de susceptibilidad magnética.

Brachysira lilliana muestra un peak en 1707 AD lo cual podría indicar condiciones oligotróficos-mesotróficos, y un pH alcalino a débilmente alcalino, enriquecidos en bicarbonato de calcio. (Van de Vijver et al., 2021), este peak se relaciona con un aumento de la susceptibilidad magnética y una disminución de MO, C, carotenoides y diatoxantina, pero a un aumento de las clorofilas. Posterior al aumento de esta especie aumenta *S. pinnata* indicando un ambiente oligotrófico. En 1727 AD *S. construens*, *S. neopinnata* y *Nitzschia denticula* aumentan, *N. denticula* tiene preferencias por plantas como superficies bentónica para desarrollarse, y además está descrita para ambientes cálidos y ricos en nutrientes (Jacques et al., 2016), lo que se condice con el aumento de *D. stelligera* y *D. glomerata* luego de su aparición. El aumento de *S. construens* y *S. neopinnata* al mismo tiempo que *N. denticula* se debería al aumento de la productividad del lago.

En 1829 disminuyen tanto *S. construens* como *S. neopinnata* y aumenta *A. minutissimum*, *Pinnularia brebissonii*, y *Staurosirella pinnata*. Considerando que *P. brebissonii* está descrita para ambientes con baja irradiación lumínica debido a capas de hielo, *A. minutissimum* es resistente a variaciones tróficas y *S. pinnata* es indicador de ambientes de bajos nutrientes, entonces el final de esta zona estaría marcando un estado con un menor nivel de nutrientes en el lago.

En consecuencia, la Zona II presenta la mayor cantidad de cambios en las condiciones tróficas.

Zona III (13 – 2 cm; 1840 – 1989 AD)

En esta zona ocurre el inicio del asentamiento humano. La mayoría de las especies presentan una disminución de sus abundancias, la cual se relaciona con un gran aumento de SM y a su vez la disminución máxima de carbonatos, materia orgánica, clorofilas y fósforo. El comportamiento de estos parámetros en conjunto estaría indicando la presencia de una tefra en 1840, lo que indicaría un importante evento de erupción volcánica, que según determinó Jara et al. en 2019 correspondería al volcán Chaitén.

La caída de esta tefra al cuerpo de agua generó un cambio significativo en el ensamble de diatomeas. Donde las únicas especies que tuvieron un aumento rápido fueron las fragilaroides, debido a su característica oportunista y a su estrategia de vida perifítica y su alta tasa de reproducción (Villacís et al., 2023), además la disminución y no recuperación de las abundancias de *D. glomerata* y *D. stelligera* indicarían, al igual que el aumento de las especies fragilaroides en conjunto, un periodo frío.

Posterior a la caída de tefra, hay un aumento de nutrientes y de diatoxantina y carotenoides, además de una SiB con una leve tendencia al aumento. Esto y el

aumento de carbonatos y materia orgánica indicaría un aumento inmediato de la productividad primaria del lago.

7.1 Desarrollo de Laguna Espejo durante el período de asentamientos humanos (1900-2022 AD).

La alta abundancia de *Cyclotella distinguenda* desde 1973 hasta el presente, especie que se caracteriza por tener tolerancia al frío (Maslennikova & Udachin 2016), además de una alta penetración de luz y condiciones alcalinas, una dominancia de *C. distinguenda* indicaría un lago profundo y en condiciones oligotróficas (Chen et al., 2014). Las condiciones oligotróficas estarían relacionadas con un bajo contenido de fósforo. Relacionada a las condiciones alcalinas se encuentra *Stephanocyclus meneghiniana*, la que a diferencia de *C. distinguenda* está relacionada a altos contenidos de fosforo, a ambientes eutróficos y contaminados por metales pesados (Cattaneo et al., 2008). Por lo que se, podría interpretar que Laguna Espejo pasó de condiciones eutróficas a condiciones oligotróficas. En relación con el ambiente eutrófico está también *Encyonopsis cesatii*, especie descrita para ambientes con altas concentraciones de nutrientes, pH alcalino y alta conductividad (Rantala et al., 2017). También especies de los géneros *Navicula* y *Nitzschia* son importantes para determinar impactos antropogénicos causados por el vertimiento de residuos sólidos y desagües domésticos, ya que son especies que se desarrollan en ambientes con alto contenido de nutrientes y conductividad (Vélez-Azañero et al., 2016), además de ser muy tolerantes a la contaminación (Celekli & Arslanargun, 2019), por lo que un aumento de estos géneros a partir de 1989 AD podría indicar un episodio de contaminación antropogénica.

Al mismo tiempo del aumento de *Nitzschia* y *Navicula*, aumenta *Achnanthydium minutissimum*, especie que indicaría una disminución del nivel del lago, debido a una mayor evaporación estacional, además *A. minutissimum* se encuentra generalmente en condiciones de buena calidad del agua, pero tiene resistencia a la contaminación hasta cierto grado (Cantonati et al., 2021).

Discostella glomerata tiene un requerimiento de luz relativamente alto, por lo que, su disminución al mismo tiempo que aumenta *C. distinguenda* indicaría un cambio en el nivel del lago, el cual fomentaría el aumento de especies de aguas profundas como *C. distinguenda* y una disminución de abundancia de especies como *D. glomerata*.

Tabellaria flocculosa, presenta un aumento en la actualidad. *T. flocculosa* puede ser planctónica o bentónica, en su forma bentónica tiene una relación directa con la presencia de metales pesados (Maslennikova & Udachin, 2017), también está descrita como tolerante a contaminantes en general (Gonçalves et al., 2018) al igual que *C. distinguenda*, por lo que un aumento de ambas especies en relación con un leve aumento de la susceptibilidad magnética podrían estar mostrando un ingreso de contaminantes a Laguna Espejo, este suceso podría estar afectando el contenido de nutrientes en el lago, demostrado con la disminución de fósforo.

Un aumento de *Aulacoseira granulata* en 1989 AD podría indicar un aumento de turbulencias, ya que, al ser una especie tan pesada necesita de estas para mantenerse a flote en la columna de agua.

La presencia de *Brachysira lilliana* indicaría un lago mesotrófico a oligotrófico, por lo que la aparición de esta especie estaría indicando el cambio de las condiciones eutróficas de Laguna Espejo en 1898 AD a las condiciones oligotróficas en la actualidad.

El cambio de estado de las condiciones tróficas de Laguna Espejo en 1989 tendría concordancia con un aumento de susceptibilidad magnética y una disminución de la materia orgánica y carbonatos, lo que habría promovido un recambio en el ensamble de diatomeas y en las condiciones del lago.

En relación con este episodio, ocurre una disminución de nutrientes reflejada en la disminución de fósforo, pero un aumento de sílice biogénica, lo que se podría explicar por el aumento de especies de diatomeas que no sean estrictas para altos contenidos de nutrientes. La relación C/N por su parte muestra una disminución de sus valores, pero indica que el origen de la materia orgánica del lago sigue siendo el fitoplancton.

Por su parte, la clorofila-a muestra un aumento en 1940 al igual que el fósforo, la diatoxantina y los carotenoides mantienen sus valores altos. Por lo que indicarían una época de alta producción primaria para esta fecha. A continuación de esto hay una disminución de las clorofilas que se relacionaría al aumento de la susceptibilidad magnética en 1989.

Los valores altos de diatoxantina y carotenoides mostrarían un aumento de productores primarios como diatomeas y algas para 1940 lo que estaría indicando condiciones de alta producción primaria, al igual que los parámetros mencionados anteriormente. Para la actualidad los carotenoides mostraron una leve baja y la diatoxantina un aumento, por lo que, se estima que hubo un aumento de la abundancia de diatomeas y una disminución de algas o plantas.

8 CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible señalar que se han determinado cambios constantes en las condiciones tróficas de Laguna Espejo.

Durante la zona I ocurre un cambio desde condiciones mesotróficas, con niveles bajos de agua a una zona II que presenta una gran variación de estado trófico, comenzando con un ambiente muy productivo, el cual pasa a un ambiente oligotrófico, para luego verse afectado por erosión de la cuenca en 1707, el cual mantiene las condiciones oligotróficas. A 20 años de este hecho, Laguna Espejo cambia su estado a mesotrófico, debido al aumento del contenido de nutrientes y calidez del agua manifestada por el aumento de *Discostella stelligera*, especie que se desarrolla en aguas cálidas. Finalmente, esta zona cambia nuevamente sus niveles de contenido de nutrientes, tomando un carácter oligotrófico marcado por la caída de una tefra en 1840, la cual provocó una disminución drástica de los parámetros indicadores de productividad primaria, como materia orgánica, nutrientes y clorofilas, generando un recambio de las especies presentes en el lago. Para 1898 este lago presenta condiciones mesotróficas, las cuales cambian en el momento que comienza el asentamiento humano en ~1900. Donde el ambiente del lago toma una condición eutrófica, lo que se podría explicar con la presencia de ganadería traída a esta zona, la cual arrastraría una gran cantidad de nutrientes a la cuenca, lo que aumentaría de la productividad del lago.

En la actualidad, el ensamble de diatomeas refleja un período frío, debido a la presencia de una diatomea específica de este ambiente, *Cyclotella distinguenda*. Además de las bajas abundancias de especies como *Discostella stelligera*, que se relacionan con baja presencia de contenido de nutrientes y bajas temperaturas.

Entonces, actualmente Laguna Espejo presenta un estado oligotrófico, con tendencia a un aumento de productividad, de acuerdo con los parámetros como nutrientes, materia orgánica y pigmentos.

Finalmente, Laguna Espejo tuvo un aumento en su producción primaria al momento de los primeros asentamientos humanos. Por lo tanto, se acepta la hipótesis planteada para esta investigación y se determina que los primeros asentamientos humanos generaron un cambio en la producción primaria de Laguna Espejo, debido a la cantidad de acciones degradantes para el ecosistema, ejemplo de estas acciones son la deforestación y el cambio de uso del suelo, además de la ganadería, lo que llevó a un mayor aporte de nutrientes a la cuenta, lo que generó el aumento de la productividad primaria del cuerpo de agua.

Actualmente, se encuentra con condiciones de productividad bajas, por una disminución de nutrientes en el lago, esto se ve reflejado con una disminución de los carotenoides. Esto se podría deber a la caída de tefra en 1989, que produjo un recambio en las condiciones del lago, además de la contaminación actual que está teniendo Laguna Espejo, la cual se vio reflejada en los proxies mencionados anteriormente y el aumento de abundancia de especies tolerantes a la contaminación como *A. minutissimum*, *T. flocculosa* y *C. distinguenda*. Esta contaminación podría darse por la eliminación de desechos de empresas o por los contaminantes propios de la urbanización, ya que, si bien las perturbaciones ocurridas en el período de asentamiento humano generaron un aumento en la productividad del lago, es probable que en la actualidad y futuro la urbanización en si este generando una contaminación del cuerpo de agua.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Alefs, J., & Müller, J. (1999). Differences in the eutrophication dynamics of Ammersee and Starnberger See (Southern Germany), reflected by the diatom succession in varve-dated sediments. *Journal of paleolimnology*, 21, 395-407.
- Alvial, I. E., Cruces, F. J., Araneda, A. E., & Urrutia, R. E. (2008). Estructura comunitaria de diatomeas presentes en los sedimentos superficiales de ocho lagos andinos de Chile central. *Revista chilena de historia natural*, 81(1), 83-94.
- Araneda, A., Jana, P., Ortega, C., Torrejón, F., Bertrand, S., Vargas, P., Fagel, N., Alvarez, D., Stehr, A., & Urrutia, R. (2013). Changes in sub-fossil chironomid assemblages in two Northern Patagonian lake systems associated with the occurrence of historical fires. *Journal of paleolimnology*, 50, 41-56.
- Arnold, T., Brenner, M., Kenney, W., & Bianchi, T. (2019). Recent trophic state changes of selected Florida lakes inferred from bulk sediment geochemical variables and biomarkers. *Journal of paleolimnology*, 62, 409-423.
- Battarbee, R. W., Carvalho, L., Jones, V., Flower, F., Cameron, N., Bennion, H., & Juggins, S. (2001). Diatom analysis. *Tracking environmental change using lake sediments*.
- Boyle, J. (2002). Mineralogical and geochemical indicator techniques. *Tracking environmental change using lake sediments*, 83-141.
- Caballero, M. (2013). Paleolimnología: como descifrar la historia de los lagos y su entorno a partir del estudio de sus sedimentos. *Paleontología Mexicana*, 3(1), 22-28.

- Cantonati, M., Zorza, R., Bertoli, M., Pastorino, P., Salvi, G., Platania, G., Prearo, M., & Pizzul, E. (2021). Recent and subfossil diatom assemblages as indicators of environmental change (including fish introduction) in a high-mountain lake. *Ecological Indicators*, 125, 107603.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes 1. *Limnology and oceanography*, 22(2), 361-369.
- Cartier, R., Brisset, E., Paillès, C., Guiter, F., Sylvestre, F., Ruaudel, F., Anthony, E. J., & Miramont, C. (2015). 5000 years of lacustrine ecosystem changes from Lake Petit (Southern Alps, 2200 m asl): Regime shift and resilience of algal communities. *The Holocene*, 25(8), 1231-1245.
- Cattaneo, A., Couillard, Y., & Wunsam, S. (2008). Sedimentary diatoms along a temporal and spatial gradient of metal contamination. *Journal of paleolimnology*, 40, 115-127.
- Celekli, A., & Arslanargun, H. (2019). Bio-assessment of surface waters in the south-east of Gaziantep (Turkey) using diatom metrics. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*.
- Chen, X., Li, Y., Metcalfe, S., Xiao, X., Yang, X., & Zhang, E. (2014). Diatom response to Asian monsoon variability during the Late Glacial to Holocene in a small treeline lake, SW China. *The Holocene*, 24(10), 1369-1377.
- CIREN. (2021). *Características demográficas y socioeconómicas comuna de Futaleufú*.
- Cony, N. L., Ferrer, N., Martínez, A., & Cáceres, E. J. (2016). Productividad, estado trófico y dinámica fitoplanctónica en la laguna Sauce Grande y su afluente homónimo (pcia. de Buenos Aires, Argentina). *Biología Acuática*.

- Cony, N. L., Ferrer, N. C., & Cáceres, E. J. (2014). Evolución del estado trófico y estructura del fitoplancton de un lago somero de la Región Pampeana: laguna Sauce Grande (provincia de Buenos Aires, Argentina). *Biología Acuática*.
- Crickmore, M., Tazioli, G., Appleby, P., & Oldfield, F. (1990). The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems, IHP-III Project 5.2 SC-90/WS-49. In: Paris: UNESCO.
- Cruces, F., Urrutia, R., Araneda, A., Torres, L., Cisternas, M., & Vyverman, W. (2001). Evolución trófica de Laguna Grande de San Pedro (VIII Región, Chile) durante el último siglo, mediante el análisis de registros sedimentarios. *Revista chilena de historia natural*, 74(2), 407-418.
- Dixit, S. S., & Smol, J. P. (1995). Diatom evidence of past water quality changes in Adirondack seepage lakes (New York, USA). *Diatom Research*, 10(1), 113-129.
- Douglas, M. (2013). Paleolimnology| Overview of Paleolimnology. *Encyclopedia of quaternary science*, 259-270.
- El-Daoushy, F. (1988). A summary on the lead-210 cycle in nature and related applications in Scandinavia. *Environment International*, 14(4), 305-319.
- Escobar, J., Restrepo, J. C., & Martínez, J. I. (2005). La paleolimnología como herramienta para el estudio y manejo de embalses. *Gestión y Ambiente*, 8(2), 51-59.
- Fontana, L., Sun, M., Huang, X., & Xiang, L. (2019). The impact of climate change and human activity on the ecological status of Bosten Lake, NW China, revealed by a diatom record for the last 2000 years. *The Holocene*, 29(12), 1871-1884.
- Gabito Velázquez, L. C. (2010). Las diatomeas fósiles permiten reconstruir cambios tróficos en un lago subtropical.

- Gajardo, R. (1994). *La vegetación natural de Chile: clasificación y distribución geográfica*. (E. Universitaria, Ed.).
- García-Rodríguez, F. (2002). Estudio paleolimnológico de lagunas de Rocha, Castillos y Blanca, sudeste del Uruguay.
- Gonçalves, S., Kahlert, M., Almeida, S. F., & Figueira, E. (2018). A freshwater diatom challenged by Zn: biochemical, physiological and metabolomic responses of *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing. *Environmental pollution*, 238, 959-971.
- Guilizzoni, P., Massafiero, J., Lami, A., Piovano, E., Guevara, S. R., Formica, S., Daga, R., Rizzo, A., & Gerli, S. (2016). Hydrobiologia, special issue on Palaeolimnology.
- Hasle, G. R., & Fryxell, G. A. (1970). Diatoms: cleaning and mounting for light and electron microscopy. *Transactions of the American Microscopical Society*, 469-474.
- Hofmann, G., Werum, M., & Lange-Bertalot, H. (2011). *Diatomeen im Süßwasser-Benthos von Mitteleuropa: Bestimmungsflora Kieselalgen für die ökologische Praxis; über 700 der häufigsten Arten und ihrer Ökologie*. Gantner.
- Hordeñana, J. (2016). Estudio paleolimnológico de un lago recientemente urbanizado: lago del Parque Rivera, Montevideo, Uruguay.
- Israde Alcántara, I., Velázquez-Durán, R., Lozano García, M. S., Bischoff, J., Domínguez Vázquez, G., & Garduño Monroy, V. H. (2010). Evolución paleolimnológica del lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 345-357.

- Jacques, O., Bouchard, F., MacDonald, L. A., Hall, R. I., Wolfe, B. B., & Pienitz, R. (2016). Distribution and diversity of diatom assemblages in surficial sediments of shallow lakes in Wapusk National Park (Manitoba, Canada) region of the Hudson Bay Lowlands. *Ecology and Evolution*, 6(13), 4526-4540.
- Jara, I. A., Moreno, P. I., Alloway, B. V., & Newnham, R. M. (2019). A 15,400-year long record of vegetation, fire-regime, and climate changes from the northern Patagonian Andes. *Quaternary Science Reviews*, 226, 106005.
- Klugh, A. B. (1926). The productivity of lakes. *The quarterly review of biology*, 1(4), 572-577.
- Lavoie, I., & Hamilton, P. B. (2008). *Guide d'identification des diatomées des rivières de l'Est du Canada*. PUQ.
- Lirio, J. M. (2011). *Eventos paleoambientales en la cuenca del Lago Nahuel Huapi registrados en testigos sedimentarios lacustres durante los últimos 19.000 años*. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Mari, F., Fucks, E. E., & Pisano, M. F. (2017). Métodos de datación. *Libros de Cátedra*.
- Martin, C., Ménot, G., Thouveny, N., Davtian, N., Andrieu-Ponel, V., Reille, M., & Bard, E. (2019). Impact of human activities and vegetation changes on the tetraether sources in Lake St Front (Massif Central, France). *Organic Geochemistry*, 135, 38-52.
- Maslennikova, A. V. e., & Udachin, V. N. (2017). Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: Diatom and geochemical proxies. *The Holocene*, 27(6), 847-859.

- Massaferro, J. (2009). Paleoeología: el uso de los quironómidos fósiles (Diptera: Chironomidae) en reconstrucciones paleoambientales durante el Cuaternario en la Patagonia. *Revista de la sociedad entomológica Argentina*, 68(1-2), 209-217.
- McGlynn, G., Mackay, A. W., Rose, N. L., Taylor, R. G., Leng, M. J., & Engstrom, D. R. (2010). Palaeolimnological evidence of environmental change over the last 400 years in the Rwenzori Mountains of Uganda. *Hydrobiologia*, 648, 109-122.
- Mortlock, R. A., & Froelich, P. N. (1989). A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 36(9), 1415-1426.
- Narancic, B., Saulnier-Talbot, É., St-Onge, G., & Pienitz, R. (2021). Diatom sedimentary assemblages and Holocene pH reconstruction from the Canadian Arctic Archipelago's largest lake. *Écoscience*, 28(3-4), 347-360.
- Ponader, K. C., & Potapova, M. G. (2007). Diatoms from the genus *Achnanthis* in flowing waters of the Appalachian Mountains (North America): Ecology, distribution and taxonomic notes. *Limnologia*, 37(3), 227-241.
- Prygiel, J., & Coste, M. (2000). Guide méthodologique pour la mise en oeuvre de l'Indice Biologique Diatomées. *Agences de l'Eau, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Direction de l'Eau & CEMAGREF, Paris, France*.
- Rantala, M. V., Luoto, T. P., Weckström, J., Rautio, M., & Nevalainen, L. (2017). Climate drivers of diatom distribution in shallow subarctic lakes. *Freshwater biology*, 62(12), 1971-1985.
- RCoreTeam. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. In <https://www.R-project.org/>

- Rivera, P., Parra, O., González, M., Dellarossa, V., & Orellana, M. (1982). Manual Taxonómico del fitoplancton de aguas continentales. *Editorial Universidad de Concepción, Concepción, 97.*
- Smol, J. P. (2009). *Pollution of lakes and rivers: a paleoenvironmental perspective.* John Wiley & Sons.
- Smol, J. P., Birks, H. J. B., & Last, W. M. (2002). Using biology to study long-term environmental change. In *Tracking environmental change using lake sediments: Terrestrial, algal, and siliceous indicators* (pp. 1-3). Springer.
- Smol, J. P., Wolfe, A. P., Birks, H. J. B., Douglas, M. S., Jones, V. J., Korhola, A., Pienitz, R., Rühland, K., Sorvari, S., & Antoniades, D. (2005). Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 102*(12), 4397-4402.
- Stoermer, E. F., & Smol, J. P. (1999). Applications and uses of diatoms: prologue. *The diatoms: applications for the environmental and earth sciences*, 3-10.
- Van de Vijver, B., Schuster, T. M., Kusber, W.-H., Hamilton, P. B., Wetzel, C. E., & Ector, L. (2021). Revision of European *Brachysira* species (Brachysiraceae, Bacillariophyta): I. The *Brachysira microcephala*-*B. neoexilis* enigma. *Botany Letters, 168*(4), 467-484.
- Vélez-Azañero, A., Lozano, S., & Cáceres-Torres, K. (2016). Diversidad de fitoplancton como indicador de calidad de agua en la cuenca baja del río Lurín, Lima, Perú. *Ecología aplicada, 15*(2), 69-79.
- Villacís, L., Moreno, P., Vilanova, I., Henríquez, C., Henríquez, W., Villa-Martínez, R., Sepúlveda-Zúñiga, E., & Maidana, N. I. (2023). A freshwater diatom perspective on the evolution of the southern westerlies for the past~ 14,000 years in southwestern Patagonia. *Quaternary Science Reviews, 301*, 107929.

- Wang, Q., Li, Y., Liu, L., Cui, S., Liu, X., Chen, F., & Jeppesen, E. (2023). Human impact on current environmental state in Chinese lakes. *Journal of Environmental Sciences*, 126, 297-307.
- Wessels, M., Mohaupt, K., Kümmerlin, R., & Lenhard, A. (1999). Reconstructing past eutrophication trends from diatoms and biogenic silica in the sediment and the pelagic zone of Lake Constance, Germany. *Journal of paleolimnology*, 21, 171-192.
- Wetzel, R. G. (1983). *Limnology*.
- Zeeb, B. A., Christie, C. E., Smol, J. P., Findlay, D. L., Kling, H. J., & Birks, H. (1994). Responses of diatom and chrysophyte assemblages in Lake 227 sediments to experimental eutrophication. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 51(10), 2300-2311.