

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA - FACULTAD DE CIENCIAS
MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE**



**UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION**

**ESTUDIO DE SEDIMENTOS LACUSTRES SUPERFICIALES EN EL
GRADIENTE LATITUDINAL Y LONGITUDINAL DE LA COSTA OESTE
DE SUDAMERICA MEDIANTE LA EVALUACIÓN DEL CONTENIDO Y
COMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA E ISOTOPOS
ESTABLES ($\delta^{13}\text{C}$ Y $\delta^{15}\text{N}$), UNA APROXIMACIÓN AMBIENTAL**

por

Nelson Antonio Cortés Matamala

**INFORME FINAL PROYECTO DE HABILITACIÓN PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE**

Profesor Guía: Dr. Sergio Contreras
Profesor Informante Interno: Dr. Juan Placencia
Profesor Informante Externo: Dr. Alberto Araneda

Concepción, Agosto de 2017

CALIFICACIONES

DEDICATORIA

Desde que nacemos la vida nos pone a prueba y empezamos a andar por un camino lleno de obstáculos que, de a poco, debemos ir superando para alcanzar nuestras metas y nuestros sueños. Lo único que debemos aprender en este camino, es que la vida está colmada de triunfos y fracasos, y que sólo depende de nosotros mismos rescatar las cosas positivas y fortalecernos con ellas para lograr todos nuestros objetivos.

*Al final de esta etapa, quiero dedicar el logro de todo el esfuerzo y sacrificio estampado en este trabajo, a mi familia, en especial a mi esposa **Ingrid**, a mis hijos **Paula** y **Sebastián**, a mi madre **Inés** y mis hermanos **Lorena** y **Gabriel**.*

Nelson C.

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este trabajo tan intenso, lleno de desafíos y oportunidades, como es el desarrollo de mi Proyecto de Habilitación, que llamaré de ahora en adelante “Tesis”, resulta inevitable, y muy humano por lo demás, que te aborde un sentimiento de egocentrismo que te lleva a atribuir el mérito de tu logro al esfuerzo personal. Sin embargo, el análisis objetivo y en plano más racional, te obliga necesariamente a hacer dar una mirada retrospectiva, la que permite develar que este logro no hubiese sido posible sin la participación de muchas personas e instituciones que permitieron, de una u otra forma, para que este trabajo llegue a un feliz término. Por ello, es un deber y acto de toda justicia, expresar a través de estas líneas mis más profundos y sinceros agradecimientos a todos ellos.

Debo agradecer de manera especial y sincera al Profesor y amigo, Dr Sergio Contreras Quintana, quién en primer lugar depositó la confianza en aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha fue verdaderamente un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi vocación como hombre de Ciencias. Las ideas propias, siempre enmarcadas en su orientación y rigurosidad, fueron la clave del buen trabajo plasmado en este trabajo, el cual no pudo llegar a término sin su siempre oportuna intervención, consejos e ideas. Le agradezco también el haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis. Muchas gracias Profesor.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento a los profesores Dr. Alberto Araneda y Juan Placencia, por su importante aporte y contribución al mejoramiento del trabajo contenido en el desarrollo de esta tesis. Debo destacar, el más profundo reconocimiento al aporte que hicieron a, primero en la evaluación de la idea general y luego través de la revisión del manuscrito a la obtención de un mejor producto. No cabe duda que vuestra participación ha enriquecido el trabajo realizado.

Luego, es mi deber como padre, esposo e hijo, extender mi más sincero y profundo agradecimiento, además de un sentido reconocimiento, a mi esposa Ingrid Bofi, a mis hijos Paula y Sebastián, y a mi madre Inés Matamala, quienes, a través de su constante apoyo, comprensión y cariño, fueron el pilar fundamental durante todo el proceso de estudio que se vio culminado con el desarrollo de mi trabajo. Por su abnegado esfuerzo de acompañarme en este desafío, de permitirme en innumerables ocasiones tener que postergar actividades familiares en pos del cumplimiento de mis metas y hacer de mi esfuerzo una labor más grata y rodeado siempre del cariño incondicional de quienes forman parte de tu vida. A través de estas palabras, más que agradecerles, decirles que los amo.

Quiero agradecer además, a la Directora del Magister, a la Dra. Catterina Sobenes por su constante apoyo y guía al buen desarrollo de todo el proceso formativo del postgrado, a la Sra. Roxana Torres, secretaria del Magister, quién siempre con su infinita voluntad y a cariño estuvo presta a brindarnos el apoyo en temas

administrativos. A los profesores del Magister, quienes contribuyeron con sus conocimientos al enriquecimiento de mi formación profesional.

No puedo dejar de extender palabras de agradecimiento a mis compañeros del programa de Magister, por hacer de esas jornadas interminables y agotadoras, más gratas y llevaderas, quienes, con su apoyo, colaboración y alegría, fueron parte fundamental en el éxito de mi trabajo. Especial mención a mi compañera Karem Urzúa quién me colaboró en el procesamiento de las figuras y mapas incluidos en mi Tesis. Así también quiero expresar mi gratitud a mis compañeras de trabajo Sandra y Andrea, quienes además de colaborarme en el procesamiento de datos, muchas veces tuvieron que suplir mi ausencia de actividades laborales, por encontrarme en clases.

Finalmente, no puedo dejar de agradecer a mi institución, el Servicio de Evaluación Ambiental, el cual aportó en el cofinanciamiento de parte de mi programa de Magister. A todos ellos, y a quienes involuntariamente omití, solo me resta decirles.....

..... GRACIAS TOTALES

RESUMEN

Los sedimentos lacustres, además de ser importantes en el registro de las condiciones ambientales pasada de los ecosistemas, corresponden a archivos ambientales de complejos procesos químicos, físicos y biológicos que dependen de factores que determinan la dinámica lacustre y de los ambientes adyacentes donde se emplazan. En tal sentido, la influencia ambiental y climática sobre la cuenca sedimentaria, configura los ciclos estacionales que dan cuenta cambios de las características físico – químicas de los sistemas naturales que intervienen en las propiedades de dichas cuencas. Asimismo, las distintas fuentes de materia y energía disponible en el ambiente a través de procesos biogeoquímicos en distintas escalas de tiempo, configuran y conforman la composición y característica del sedimento lacustre. En tal sentido, la composición de la materia, sea de origen alóctono o autóctono, y la velocidad con que se depositan en el fondo de los lagos, dan cuenta de la actividad del éste como receptor de una cuenca y como centro de actividad biológica. En particular, los registros sedimentarios expresados como el contenido de materia orgánica (MO), los constituyentes de carbono y nitrógeno (expresados como carbono y nitrógeno orgánico [COT y NOT]) y su composición isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$), permiten hacer un análisis retrospectivo de las condiciones climáticas y ambientales de distintos sistemas hídricos, especialmente de aquellos de baja escurrentía y de alta residencia de las masas de aguas, como es el caso de los sistemas lacustres.

En este contexto, el presente estudio busca evaluar, sobre la base de series de datos de materia orgánica evaluada como COT, NOT, y sus isótopos estables $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, además de datos climatológicos y geográficos de 76 lagos del cordón andino ubicados en la costa oeste de Sudamérica, patrones geográficos y ambientales con el objeto establecer y/o identificar patrones de gradientes climatológicos, y potenciales efectos antropogénicos determinados por proximidad a centros urbanos o usos intensiva y extensiva de las cuencas lacustres en sus más variadas formas.

Los resultados obtenidos en el presente estudio permitieron establecer patrones distribucionales en la composición geoquímica de los sedimentos lacustres en gradientes que pueden ser asociados a los componentes hidroclimáticos (i.e.

precipitación y temperatura) y/o por el emplazamiento en el eje longitudinal de la costa oeste de Sudamérica.

Los resultados permitieron identificar un punto de inflexión en el comportamiento latitudinal en la data geoquímica a partir de los 40°S, el que fue asociada al límite norte del núcleo de la deriva de los vientos del oeste (SWW de su sigla en inglés) que marcan un cambio climático caracterizado por una disminución de precipitaciones y aumento de temperaturas hacia el norte afectando el origen y composición isotópica de la materia orgánica.

Los hallazgos del presente estudio permiten establecer que el mayor aporte del COT tiene su origen en plantas terrestres del tipo C₃ y algas lacustres, permitiendo inferir además de las condiciones tróficas de los lagos, donde se reportan altos niveles de N, y consecuentemente bajas relación de las variable C:N. En la búsqueda de identificar patrones geográficos en los cluster de sistemas lacustres, los resultados permitieron identificar dos principales grupos de cuerpos lacustres, uno representado por lagos costeros o situados bajos los 200 msnm y el otro grupo dominado por lagos montañosos o precordilleranos, condición presumiblemente atribuida a las condiciones ambientales definidas en cada uno de estas áreas tales como grado de intervención antrópica potencial asociada, características de las condiciones vegetacionales ribereñas, entre otras. Dentro de este segundo grupo se evidencia un grupo de lagos dominados por sitios presentes en las latitudes 42 y 46°S, que corresponde a aquellos cuerpos lacustres que por condiciones de acceso presentan las condiciones de menor intervención ambiental. La ubicación y características generales de los lagos que conforman esta asociación, se interpreta como lagos con condiciones ambientales moderadas desde el punto de vista de la intervención antropogénica asociado a cuencas en cordones montañosos.

Finalmente, los resultados arrojan importante evidencia de variaciones en la composición geoquímica de los sedimentos respecto de variables climatológicas estudiadas y de particularidades espaciales que dan cuenta las variaciones de los contenidos de materia orgánica y composición isotópica relacionada con los principales aportes de material alóctono de las cuencas lacustres.

ABSTRACT

Lacustrine sediments, as well as being important in the ecosystem paleoenvironmental are environmental archives on complex chemical, physical and biological processes that depend on different factors that determine the lake dynamics. In this sense, climate influence on the sedimentary basin, set the seasonal cycles that determine changes in the physical - chemical characteristics of natural systems involved in the biological and abiotic characteristics of these basins. Also, the external energy available in the environment or in the natural system around the lakes, is represented and registered in the sediments; therefore, the composition of materials allochthonous or autochthonous origin, and the rate of deposition on the bottom, expressed the lake activity as a recipient of a basin and a center for biological activity. In particular, the sedimentary records of organic matter through the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isotopes, allow us to infer about paleoclimatic and environmental retrospective analysis of lacustrine systems.

The aim of this study is to evaluate, on the basis of geochemical data series (organic matter TOC, NOT, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$), climatological and geographical data of 76 lakes in the Andes mountain range, climatic gradients patterns, and potential anthropogenic effects, by proximity to urban centers or intensive and extensive uses of the lake basin.

The results obtained in the present study allowed to establish distributional patterns in the geochemical composition of the lacustrine sediments in regard of the hydroclimatic components precipitation and temperature. This gradient shows a marked inflection point from the 40°S that can be associated to the north limit extension of the Southern Westerlies Winds (SWW), characterized by geochemical composition, origin of the organic matter and its isotopic composition.

The findings of the present study allowed establishing the origin of the organic matter present in the surface lake sediments, resulting that the greatest contribution of organic carbon has its origin in terrestrial plants C_3 and lacustrine algae, allowing to infer in addition to the trophic conditions of lakes, where high N levels are reported, and consequently low C: N ratio. In the search to identify geographic patterns in the clusters

of lacustrine systems, the results allowed to find two main groups. The first one, represented by coastal lakes or located below 200 meters above sea level, and the other group dominated by mountainous or pre Andean lakes. Within this second group there is a subgroup of lakes dominated by lakes occurring in latitudes 42 and 46 ° S. The location and general characteristics of the lakes seems to indicate that correspond to lakes without or with low degree of human intervention located in the middle basins of the mountains.

Finally, the results showed important evidence of variations in geochemical composition of sediments respect to the climatological variables analyzed, and the spatial particularities that account for the variations of the contents of the organic matter and isotopic composition related to the main contributions of the lake basins

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes generales.....	1
Registros sedimentarios lacustres	2
Condiciones climatológicas del área de estudio.....	2
Estado actual del conocimiento de las cuencas lacustres del área de estudio.....	3
II. MARCO TEÓRICO	5
Objetivo General:.....	17
Objetivos Específicos:	17
III. MATERIALES Y MÉTODOS	18
Área de Estudio.....	18
Análisis isotópico de los sedimentos	24
Análisis estadístico y procesamiento de los datos	25
IV. RESULTADOS.....	26
Climatología	26
Proxies geoquímicos.....	28
V. DISCUSIÓN	51
VI. CONCLUSIONES – RECOMENDACIONES.....	59
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de principales proxies geoquímicos orgánicos utilizados en reconstrucciones paleolimnológicas (extraído de Meyers, 2003).	11
Tabla 2. Listado de lagos analizados en el presente estudio. Se entrega la ubicación geográfica de cada lago y su altura respecto del nivel del mar (msnm)	18
Tabla 3. Valores de los parámetros analizados en los sedimentos de los 76 lagos en estudio. Los valores en negrita representan valores cuya medición supera las 2 desviaciones estandar del total de las muestras analizadas.	29
Tabla 4. Contribuciones porcentuales de los factores del análisis multivariado (N=76).	43
Tabla 5. Contribuciones porcentuales de los factores del análisis multivariado (N=76). Los resultados que corresponden a los centroides de las categorías se muestran en la parte inferior de la tabla.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Localización geográfica de los lagos en estudio a lo largo del gradiente latitudinal de la costa oeste de Sudamérica. 21
- Figura 2.** Estaciones Meteorológicas con información disponible utilizada en el reanálisis (puntos azules), y cuerpos lacustres incluidos en este estudio (puntos rojos). Las líneas verdes indican el área demarcada por el núcleo de los Vientos de la Deriva del Oeste..... 23
- Figura 3.** Hidroclimatología (1979-2010) en la costa oeste de América del Sur a través del reanálisis periodicidad mensual del Sistema de Reanálisis de Pronóstico Climático (CFSR), basado en el modelo de pronóstico global de NCEP y estaciones meteorológicas disponibles. Los puntos negros corresponden a los lagos en estudio. A) Temperatura; B) Precipitaciones y C) cobertura de nieve..... 27
- Figura 4.** Grafico Box-Plot para los descriptores estadísticos de los parámetros en los sedimentos lacustres. Los gráficos muestran valores totales para todo el rango de lagos analizados..... 31
- Figura 5.** Valores generalizados de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ respecto de la relación C:N..... 32
- Figura 6.** Representación gráfica de las variables climatológicas: Cobertura de nieve, Temperatura y Precipitación, en el rango latitudinal de la zona estudiada. La flecha indica el punto de flexión seleccionado (40°S) como límite para la categoría de lagos norte y sur..... 33
- Figura 7.** Representación gráfica de las variables climatológicas: Cobertura de nieve, Temperatura y Precipitación, en el rango altitudinal de la zona estudiada. El eje de las ordenadas se presenta en escala logarítmica, para reducir la variabilidad y dispersión de los datos entre las tres variables..... 33
- Figura 8.** Contenido de Carbono Orgánico Total (A), Nitrógeno Orgánico Total (B, para el total de los lagos analizados (N=76) según gradiente latitudinal, según macrozonas Norte (azul) y Sur (rojo)..... 35
- Figura 9.** Contenido de Isótopo de Carbono (C) e Isótopo de Nitrógeno (D), para el total de los lagos analizados (N=76) según gradiente latitudinal, según macrozonas Norte (azul) y Sur (rojo)..... 36
- Figura 10.** Variación latitudinal del contenido de Carbono orgánico total (columna izquierda) y Nitrógeno orgánico total (columna derecha) en relación a las variables climatológicas: Cobertura de Nieve (superior), Precipitación (medio) y Temperatura (inferior)..... 37
- Figura 11.** Variación latitudinal del contenido de Isótopo de Nitrógeno ($\delta^{13}\text{C}$) (columna izquierda) e Isótopo de Nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) (columna derecha)

en relación a las variables climatológicas: Cobertura de Nieve (superior), Precipitación (medio) y Temperatura (inferior).	38
Figura 12. Variación latitudinal de la razón $C_{org}:N_{org}$ (C:N) en relación a las variables climatológicas: Cobertura de Nieve (superior), Precipitación (medio) y Temperatura (inferior).....	39
Figura 13. Variación altitudinal de las variables geoquímicas en relación a la variable climatológica Precipitación (kg/m^2). Se presentan los datos de COT y NOT (superior), $\delta^{13}C$ (medio) y $\delta^{15}N$ (inferior).....	42
Figura 14. Análisis de Componentes Principales (ACP), para el total de lagos analizados (N=76) considerando los contenidos de materia orgánica en los sedimentos superficiales.....	46
Figura 15. Análisis de Componentes Principales (ACP), para el total de lagos analizados (N=76) considerando los contenidos de materia orgánica en los sedimentos superficiales. Lagos de zonas bajas o valle (símbolo verde) y lagos de montaña (símbolo azul).....	48
Figura 16. Análisis de Componentes Principales (ACP), para el total de lagos analizados (N=76) considerando los contenidos de materia orgánica en los sedimentos superficiales. Lagos de zonas bajas o valle (símbolo verde) y lagos de montaña (símbolo azul).....	49
Figura 17. Valores generalizados de $\delta^{13}C$ and C:N de las principales fuentes de materia orgánica a los sedimentos proveniente de las plantas	52
Figura 18. Variación del Carbono isotópico en ecosistemas (superior) y variación en el contenido C:N en el ecosistema (inferior). La línea terminada en punta de flecha indica que el rango es mayor a la escala presentada en el eje. (<i>Figura modificada de Wang & Wooller, 2006</i>).....	53
Figura 19. Esquema representativo del comportamiento de los vientos oceánicos sobre el cordón montañoso de Suramérica.....	55
Figura 20. Registros de los vientos de la deriva del oeste (westerlies) a condición de 925 hPa para el verano (columna de la izquierda) e invierno (columna de la derecha) según modelaciones obtenidas por Rojas <i>et al</i> 2009 (para la última glaciación máxima).....	56

NOMENCLATURA

$\delta^{13}\text{C}$	Razón isotópica de carbono
$\delta^{15}\text{N}$	Razón isotópica de nitrógeno
δ	Notación delta representa diferencias en la razón isotópica de una muestra con respecto a un material estándar conocido y se expresa de la siguiente forma: $\delta^{13}\text{X} = ((R_{\text{muestra}}/R_{\text{estándar}}) - 1) \times 1000$
CIT	Carbono inorgánico total
CFSR	Sistema de Reanálisis de Pronóstico Climático (de su sigla en inglés)
C:N	Razón (o relación) Carbono – Nitrógeno
COT	Carbono orgánico total
CT	Carbono total
Eds	Editores
e.g.	por ejemplo
<i>et al</i>	y colaboradores
MIC	Manejo integrado de cuencas
MOT	Materia orgánica total
NOT	Nitrógeno orgánico total
NSCA	Norma Secundaria de Calidad Ambiental
Pp	páginas

I. INTRODUCCIÓN

Antecedentes generales

Los cuerpos de aguas continentales superficiales (lagos y ríos) son considerados sistemas funcionales en el marco de una cuenca hidrográfica en la cual intervienen una serie de factores que tienen relación con factores geológicos, climáticos, usos antrópicos, así como factores biológicos (Hairston & Fussman, 2002).

Los lagos constituyen una red de amortiguación de caudales y sedimentos provenientes de las cuencas altas. Las partes altas de los ríos transportan el agua producto de la fusión del hielo de los glaciares, precipitaciones y granizo. Las lagunas regulan y estabilizan los caudales gracias a su capacidad receptora que incluso puede amortiguar fenómenos importantes como avalanchas y desastres naturales (Hairston & Fussman, 2002).

El estudio del comportamiento de los sistemas lacustres y cuencas asociadas es un factor relevante a la hora de establecer un uso sustentable de dichos cuerpos de agua en consideración a los distintos factores que determinan las características físicas, químicas y biológicas de los sistemas acuáticos, y su relación con las medidas de protección sobre los ecosistemas acuáticas con el objeto de salvaguardar el valor ambiental de dichos sistemas, como el aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos que ofrecen a la cuenca (Brönmark & Hansson, 2002).

Los sistemas lacustres tienen una estructura característica establecida inicialmente por su origen y la ubicación geográfica. En el cono sur de América las principales agrupaciones lacustres se encuentran asociadas a cordones montañosos. Lagos más profundos tienden a tener un origen glacial, tectónico y volcánico, y debido a su ubicación geográfica, presentan baja productividad y son generalmente clasificados como oligotróficos o con bajo nivel de enriquecimiento de nutrientes, que son caracterizados por bajo contenido de clorofila a y alta transparencia de sus aguas

(Pizarro *et al*, 2016). Los lagos y lagunas de origen fluvial, sufren regularmente procesos erosivos que pueden llegar a ser notables, debido principalmente al efecto del viento y en menor medida a los cambios en los niveles del agua, lo que sumado a bajas profundidades y productividades altas en tiempos breves, dan cuenta de condiciones de lagos mesotróficos o eutróficos, con altos niveles en el contenido de nutrientes (Vila, 2003; Schindler, 2006).

Registros sedimentarios lacustres

La información de carácter ambiental que proveen los sistemas acuáticos continentales, especialmente los sistemas lacustres, son de un gran valor científico tanto por ser un registro de la intervención de origen antrópico, como por el registro geológico reciente y archivo de las condiciones del pasado ambiental y procesos biogeoquímicos del cuerpo de agua y de su cuenca aportante (Torres *et al*, 2012).

En la actualidad se ha desarrollado una importante línea de investigación llamada Paleolimnología, ciencia que, utilizando el registro sedimentario del fondo de los lagos, efectúa estudios de información de datos de largo plazo para entender muchos de los problemas ambientales y ecológicos de las cuencas lacustres, a través del uso de información física, química y biológica preservada en registros sedimentarios para reconstruir las condiciones ambientales pasadas en el ecosistema acuático (Wang & Woller, 2006; Smol, 2008) y la reconstrucción de condiciones paleoambientales y paleoclimáticas asociadas a las grandes eventos climatólogicos relacionados, principalmente con períodos de condiciones extremas (glaciaciones) y variaciones significativas de las condiciones atmosféricas en el régimen y condiciones de las celdas de circulación de los vientos (Moreno *et al*, 2001; Markgraf, 2003; Moreno, 2004; Moreno *et al.*, 2012)

Condiciones climatológicas del área de estudio

El registro climático en zonas geográficas da cuenta de eventos que inciden sobre los ambientes físicos (sequías, inundaciones, abundancia de actividad agrícola, entre otros) por lo cual resulta de gran importancia disponer de información climática de sobre las regiones en estudio para buscar y establecer relaciones físicas y funcionales que caracterizan y configuran los sistemas lacustres y los potenciales efectos antropogénicos (Del Puerto *et al*, 2011; Fawcett *et al*, 2011; Quiroz, 2012).

La paleoclimatología es el estudio de los procesos climáticos en el pasado geológico reciente, más allá de los registros históricos instrumentales, y resulta de gran importancia para identificar y entender los procesos que dieron origen a las variaciones climáticas pasadas. Los estudios paleoclimáticos derivan entre otros, del estudio de los sedimentos marinos y lacustres, a través de los cuales se registran los procesos ambientales que configuran la composición y estructura de dichos sedimentos (Quiroz, 2012; Oliva & Ortiz, 2012).

La falta de información pretérita de cuencas lacustres respecto de los forzantes climáticos que configuraron las características y la composición actual de los cuerpos lacustres, resultan particularmente preocupante en nuestro país, por cuanto dicha información resulta relevante respecto de las líneas de bases ambientales (Cisternas *et al*, 2000) principalmente de aquellos cuerpos de aguas lacustres, que por su ubicación geográfica y/o por los usos de las cuencas, presentan problemas ambientales recientes debido a la presión por sus usos productivos, o como resumideros de desechos de tipo industriales o domiciliarios (Meyers & Ishiwatari, 1993; Muri *et al*, 2004).

Estado actual del conocimiento de las cuencas lacustres del área de estudio

Disponer de información respecto a la historia ambiental y climática de los sistemas lacustres de nuestro país es parte de los antecedentes de carácter científico-técnico que deben ser incorporados a los instrumentos normativos relacionado a las

evaluaciones ambientales de proyectos, confección de líneas de base ambiental, dictación de normas secundarias de calidad ambiental (NSCA) y en los sistemas de manejos integrados de cuencas (MIC), entre otros.

En la actualidad, los estudios sobre sistemas lacustres en la costa oeste de América del Sur, particularmente en Chile, se concentran principalmente en la caracterización de las condiciones físicas, químicas y biológicas de los lagos, y caracterización de los niveles tróficos de los éstos, lo cuales están asociados a la estimación de los niveles de productividad y la determinación de los nutrientes limitantes en la productividad primaria (Soto & Campos, 1995; Soto & Stockner, 1996; Soto, 2002; Diaz *et al.*, 2007).

En los últimos años se han intensificado los estudios en establecer las relaciones entre las condiciones tróficas de los sistemas lacustres, el uso intensivo de la tierra, (actividades antropogénicas) así como por las condiciones térmicas del agua resultante del calentamiento global (Pizarro *et al.*, 2010; León-Muñoz *et al.*, 2013; Pizarro *et al.*, 2014; Pizarro *et al.* 2016). En particular, las asociaciones funcionales y las respuestas geoquímicas como registros lacustres asociados al crecimiento de la población humana, conversión extensiva de bosques nativos en plantaciones forestales de las cuencas, agricultura y áreas urbanas (Echeverría *et al.*, 2006; León-Muñoz *et al.*, 2013; Pizarro *et al.*, 2014)

En este contexto, el presente estudio pretende realizar el análisis de la variabilidad de la composición geoquímica de los sedimentos lacustres superficial con una aproximación ambiental de un total de 76 lagos a lo largo de la costa occidental de Sudamérica basada en el contenido de materia orgánica, y principalmente a través de su composición isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$) y la relación C:N, y su relación con la climatología y las principales características geográficas de las cuencas lacustres.

II. MARCO TEÓRICO

En los últimos 200 años se ha documentado un aumento en la temperatura media de la superficie terrestre, sobre la cual, dentro de la información disponible, no existe precedente en la historia geológica del planeta, atribuible principalmente al aumento en la concentración de los gases invernadero producto de la actividad humana. En escalas temporales más amplias (4-7 mil años), el impacto de la actividad humana sobre la Tierra se refleja también en otros procesos físicos y biológicos sobre la superficie de la tierra, principalmente asociada a patrones erosivos de la superficie foliar vegetacional, entre otros (Thompson, 2010).

El entendimiento de la variabilidad de los factores forzantes de la composición y configuración biogeoquímica de los ecosistemas naturales, es esencial para un conocimiento adecuado que permita la creación de políticas que permitan a los estados disponer del conocimiento que permita enfrentar los cambios a futuro y un manejo adecuado de los sistemas naturales desde la óptica de los cambios de los sistemas naturales y del aporte de las actividades antropogénicas a dichas sistemas, acelerando o retrasando la ocurrencia de fenómenos relacionados a los procesos biogeoquímicos asociados a la corteza terrestre y los subsistemas que los componen (Ventura, 2009)

Para entender plenamente los mecanismos del cambio climático e identificar las señales de la variabilidad natural en conjunto con aquella aportada por el hombre, es necesario contar con registros adecuados de los fenómenos y procesos que dan origen al cambio climático. Una de las fuentes de información para la reconstrucción paleoclimática más atractiva son los sedimentos lacustres, debido a que los lagos son trampas naturales de acumulación continua de sedimentos (Meyers, 1997; Smol, 2008; Adrian *et al*, 2009). En éstos se conservan no sólo las evidencias de los procesos climáticos, sino también de los procesos ambientales independientes del clima (como el vulcanismo y la sismicidad), ocurridos varios cientos a miles de años (Stefen *et al*, 2011).

La complejidad del sistema climático terrestre hace difícil atribuir a causas específicas los cambios que están ocurriendo y, más aún, predecir sus efectos a mediano y largo plazo (Stefen *et al*, 2011). Es por eso que comprender, cómo el clima ha variado naturalmente en tiempos recientes, es fundamental para discriminar cuánto del cambio son atribuibles a la acción antrópica y cuál puede ser la capacidad de respuesta de los ecosistemas que han sido depositarios de su impacto. En consecuencia, es la información de mediano y largo plazo la que incrementa la capacidad de modelar escenarios futuros y modificar el accionar presente para mitigar los potenciales impactos (Olfield & Alverson, 2003; Zolitschka & Enters, 2009).

Ante la falta de datos instrumentales que aporten información sobre las condiciones anteriores a la llegada de la era antropogénica, la reconstrucción paleoambiental ha resultado una herramienta fundamental para conocer las condiciones pre- industriales, el rango de variabilidad natural de los ecosistemas, los mecanismos, la intensidad y la rapidez de los cambios que han tenido lugar, causas y cronología de los cambios y la capacidad de resiliencia de los ecosistemas involucrados (Oldfield & Alverson 2003; Zolitschka & Enters 2009).

En este sentido, los sistemas lacustres tienen la posibilidad de registrar cambios ambientales y climáticos ocurridos tanto dentro del cuerpo de agua, como en su cuenca de captación. Los restos fósiles y subfósiles de plantas y animales que vivieron dentro o en los alrededores del mismo, permiten inferir las características bajo las cuales vivieron; así como su evolución a lo largo del tiempo, lo que resulta indicador de los cambios en el ambiente sedimentario (O'Beirne *et al*, 2015). Por otro lado, el material detrítico transportado contiene información de las condiciones de intemperismo, erosión, así como eventos volcánicos ocurridos dentro y fuera de la cuenca. Estos materiales, además, permiten inferir cambios producidos en la interfase agua-sedimento, así como condiciones diagenéticas asociados a dichos sistemas. Otra particularidad de los lagos es que, debido a la elevada tasa de sedimentación, en comparación con otros sistemas ambientes acuáticos (ríos, sistemas marinos), es

posible tener un registro detallado de alta resolución de los cambios ambientales de los últimos siglos, permitiendo establecer una aproximación diagnóstica del efecto y las presiones sobre dichos ecosistemas (Zolitschka & Enters, 2009).

En esta línea, y frente a la necesidad de recurrir a estudios predictivos en base a la historia pasada de nuestros sistemas naturales, es que los sedimentos depositados en fondos de lagos y lagunas, como matrices ambientales de larga data, contienen una amplia variedad de información paleoambiental, cuyos registros dan cuenta de las condiciones ambientales pasadas. En ellos encontramos indicadores sedimentológicos, geoquímicos, geofísicos y biológicos, cuyo estudio se combina dentro del campo de la paleolimnología (Smol, 2008; Zolitschka & Enters 2009). Los datos obtenidos son generalmente llamados datos proxy o proxies y son utilizados para evaluar la variabilidad de las condiciones climáticas pasadas y/o una reconstrucción paleoambiental de sistemas naturales (Wefer *et al*, 1999), así como las influencias humanas sobre los sistemas lacustres y/o sobre su cuenca de drenaje.

La sedimentación en los sistemas lacustres está controlada por procesos atmosféricos (clima), por la naturaleza geológica de la cuenca y sus características fisiográficas e hidrológicas, entre otras (O'beirne *et al*, 2015). Asimismo, el clima y la geología también controlan la formación de suelos, la cobertura vegetal de la cuenca, la química del agua y las comunidades planctónicas asociadas a los lagos. Debido a que la geología no cambia significativamente durante el tiempo de vida de la mayoría de los sistemas lacustres, las variaciones observadas en el registro sedimentario se relacionan principalmente a la variabilidad climática, y en tiempos recientes debido a la influencia antropogénica se ha convertido en un factor cada vez más determinante de variabilidad y de las condiciones de usos e intervenciones antrópicas sobre las cuencas aportantes de los sistemas lacustres (Cohen, 2003).

A pesar de que los parámetros meteorológicos no pueden ser directamente medidos en los sedimentos lacustres, la información indirecta, tanto cualitativa como cuantitativa, que aportan los registros proxies puede ser usada para reconstrucciones

paleoclimáticas (Markgraf, 1991; Markgraf *et al*, 1992; Markgraf, 1993; Markgraf *et al*, 2000; Markgraf *et al*, 2003). Esto se debe, como ya se mencionó, a que los procesos sedimentológicos, geofísicos, geoquímicos y biológicos se hallan predominantemente controlados por las condiciones climáticas, aportando una buena vía de aproximación a la variabilidad climática pasada.

En tal sentido, uno de los fenómenos o eventos climáticos que configuran o definen condiciones de carácter regional en latitudes del hemisferio sur, son identificadas como la deriva de los vientos del oeste (SWW de su sigla en inglés), que son los vientos oceánicos más intensos en el mundo, que controlan el flujo de nutrientes, calor y gases entre el Océano Antártico y la atmosfera e influenciando el clima del hemisferio sur (Garreaud, 2007, Moy *et al* 2008; Jara & Moreno, 2014). Al respecto, se ha hipotetizado que variaciones en la intensidad y posición latitudinal de estos vientos australes ejercería una influencia sobre el ciclo del carbono y el clima global, principalmente a través del intercambio de gas entre la atmosfera y el Océano Antártico (Le Quéré *et al*, 2007; Lovenduski *et al*, 2007; Toggweiler, 2006; Jara & Moreno, 2014).

La deriva de los vientos del oeste está asociada a un tren de tormentas que producen intensas lluvias en el continente, con las más abundantes precipitaciones (> 7000 mm año⁻¹) caracterizando su núcleo. El margen norte de estos vientos australes migra estacionalmente, expandiéndose hacia el ecuador durante invierno y contrayéndose en verano, con su mayor gradiente latitudinal entre los 35°S y 40°S. La intercepción orográfica de la deriva de los vientos del oeste entrega más de 1000 mm al año de lluvias al margen oeste de Sudamérica (lado Pacífico) y menos de 100 mm al año a lado este (lado Patagónico), con la mayor cantidad de precipitación observada en el área de perenne influencia de estos vientos australes (al sur de los 40°S) en la costa Pacífica de los Andes Patagónicos. El régimen pluvioso asociado a la deriva de los vientos del oeste sostiene bosques lluviosos temperados con una segregación climática de vegetación que conduce a un reconocimiento marcado de comunidades de bosque lluvioso a lo largo de un gradiente marcado en precipitación e intensidad de viento, bajas temperaturas y largo de la estación de crecimiento (Fletcher & Moreno, 2012). Adicionalmente, la orientación N-S de la Cordillera de los Andes establece un

efecto de sombra de lluvia que caracteriza la vegetación del lado este de la cordillera (lado Pacífico) con más sub-húmeda a semi-árida estepa Patagónica a medida que la humedad disminuye.

El sur de Sudamérica, más allá de los 30° de latitud sur, es la única gran masa de tierra que se extiende a través del núcleo actual de la deriva de los vientos del oeste (~60°S). La dominante influencia de estos vientos oceánicos en el clima actual del sur de Sudamérica sugiere que los cambios pasados en la hidrología y el ecosistema austral deben haber sido controlados por la variabilidad (intensidad y ubicación) de la deriva de los vientos del oeste, la cual debería haberse registrada en los innumerables registros sedimentarios lacustres de la región (Villa-Martínez & Moreno, 2007; Moy *et al.* 2008; Moreno *et al.*, 2010; Fletcher & Moreno, 2012). Dichas condiciones también han sido registradas en el margen subantártico del Pacífico Sur, abarcando las islas de Nueva Zelanda y Australia, aunque el régimen de los vientos de la deriva del oeste se encuentran gobernadas por condiciones de grandes masa de aguas afectas al efecto supresor de los vientos del norte que dan condiciones templados y de mayor aridez (McGlone *et al.*, 2000)

Este estudio propone examinar la relación actual entre la posición e intensidad de la deriva de los vientos del oeste en el sur de Sudamérica con los cambios en temperatura, precipitación y vegetación inferida a través de proxies geoquímicos contenidos en sedimentos superficiales lacustres a lo largo del centro-sur de Chile.

Por otro lado, la variabilidad de las propiedades de los ecosistemas lacustres en el tiempo y en el espacio nos pueden ayudar a entender los factores que regulan la dinámica y la estabilidad de dichos ecosistemas a través de reguladores de carácter regional extrínsecos, tales como el clima o la geología (Cottingham *et al.*, 2000) o de carácter local ya sean intrínseco a cada sistema (interacciones ecológicas) o extrínsecas (disponibilidad de nutrientes (Patoine & Leavitt, 2006).

Las propiedades de los ecosistemas lacustres y su estabilidad, pueden ser determinadas localmente por la composición y diversidad de las comunidades

biológicas que caracterizan las distintas cuencas hidrográficas o simplemente por el tipo de perturbaciones experimentadas por dichos sistemas asociados a la actividad antropogénica (Meyers, 2006; Das *et al*, 2009).

Los cambios ambientales dejan señales geoquímicas en los registros sedimentarios de los lagos, que pueden ser utilizados para interpretar y reconstruir su historia ecológica y ambiental pasada (Meyers, 1997, 2003; O'Beirne *et al*, 2015). Estos proxies geoquímicos incluyen biomarcadores moleculares, elementos trazas, e isótopos estables que pueden ser usados para estimar y medir indirectamente los cambios producidos por las perturbaciones ocurridas en las cuencas lacustres y/o por la actividad biológica producida en dichos sistemas, principalmente la productividad primaria (Meyers, 2003,2006; Routh *et al*, 2007).

Algunos de los proxies son relativamente conservativos en el ambiente, con muy bajas tasas de variación, sin embargo, otros son influenciados por las interacciones de la interface agua-sedimento, los procesos biológicos y las actividades antropogénicas (Routh *et al*, 2007). En general los proxies biogeoquímicos proporcionan dos tipos de información: el origen de la materia orgánica sedimentaria, y el tipo de organismos que la produce (Meyers, 2003; Routh *et al*, 2007; Eglinton & Eglinton, 2008; Castañeda & Schouten, 2011; O'Beirne *et al*, 2015).

Al respecto, algunos autores han intentado sistematizar y clasificar los indicadores en dos grupos principales de datos proxies (biológicos y no biológicos) los cuales han sido descritos sistematizados para ambientes marinos en estudios paleo oceanográficos (Tenorio, 2011), sin embargo la clasificación más utilizada de proxies geoquímicos orgánicos en estudios de reconstrucción paleolimnológica y los tipos de información que ellos proveen, son los que se resumen en la Siguiete Tabla (Meyers, 2003).

Tabla 1. Resumen de principales proxies geoquímicos orgánicos utilizados en reconstrucciones paleolimnológicas (extraído de Meyers, 2003).

Propiedad medida	Información del Proxy
Concentración de Carbono Orgánico Tasa de acumulación de masa de Carbón Orgánico	Cantidad de Materia Orgánica Tasa de suministro de materia orgánica
$C_{orgánico}:N_{total}$	Identificación de la proporción de materia orgánica de origen algal o de plantas terrestres
$\delta^{13}C_{orgánico}$	Proporciones de plantas C_3 y C_4 , Aumento de la productividad de algas
$\delta^{15}N_{total}$	Identificación de las proporciones de materia orgánica de algas y plantas terrestres, evidencia de fijación de nitrógeno y productividad algal
Composición <i>n</i> -alcanos	Aportes desde algas, macrófitas acuáticas y plantas terrestres
Composición de ácidos <i>n</i> -alcanoicos	Aportes de ceras de plantas terrestres
Composición de ácidos grasos ramificados e insaturados	Aportes microbianas y algales, nivel de procesamiento microbiana
Composición <i>n</i> -alcanol	Aportes desde algas, macrófitas acuáticas y plantas terrestres
Composición de esteroles	Aportes desde algas y plantas terrestres
Compuestos de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	Rutas de suministro de materia orgánica
Composición de pigmentos	Paleo ensamblajes algales
Compuesto específico $\delta^{13}C$	Origen de biomarcadores individuales
Derivados de la lignina	Cantidad de materia orgánica desde plantas terrestres. Antiguos ensamblajes de plantas terrestres
Hidrógeno Rock-Eval e índices de Oxígeno	Identificación de la proporción de materia orgánica de origen algal y plantas terrestres

La formación de los sedimentos lacustres depende de factores climáticos y, por ende, bajo condiciones naturales el clima regional dominante ejerce control sobre el tipo de sedimentación. Los sedimentos lacustres son el resultado de tres mecanismos principales (Zolitschka y Enters 2009):

- El flujo de partículas minerales procedentes de la cuenca de drenaje (por aporte fluvial o escorrentía) y atmosféricos, generan sedimentos clásticos. Estos sedimentos clásticos aumentan bajo condiciones climáticas frías y/o secas, donde la erosión física y la escasa cobertura vegetal favorecen el transporte (por escorrentía o acción eólica) de grandes cantidades de detritus de origen mineral. En el caso de las lagunas costeras, los sedimentos clásticos pueden responder también a depósitos de alta energía producto de la interacción con el océano. La dominancia de sedimentos clásticos en lagos y lagunas se acompaña de niveles pobres en nutrientes (oligotróficos), que limitan una elevada productividad orgánica.
- La productividad biológica en el cuerpo de agua genera sedimentos orgánicos o biogénicos, a medida que la materia orgánica muerta se descompone y se acumula en el fondo. Este tipo de sedimento aumenta bajo condiciones climáticas templadas a cálidas y húmedas. La buena cobertura vegetal en la cuenca de drenaje, reduce la disponibilidad y capacidad de transporte de materiales clásticos hacia el cuerpo de agua. En estas condiciones la erosión química promueve la liberación de nutrientes del sustrato rocoso, que son incorporados a la materia orgánica vegetal, acumulados en el suelo o transportados al cuerpo de agua como iones disueltos. Esto determina condiciones mesotróficas a eutróficas, aumento de la productividad orgánica e incremento de los sedimentos orgánicos.
- La precipitación química de minerales de la columna de agua forma sedimentos evaporíticos. Esto ocurre principalmente bajo condiciones climáticas áridas a semiáridas, cuando por evaporación se incrementa la salinidad y el pH del agua. Además de la calcita (que en latitudes medias puede tener origen biogeoquímico) los compuestos más comunes en los sedimentos evaporíticos son el sulfato de calcio (yeso) y cloruro de sodio (halita).

Los procesos vinculados a la génesis y diagénesis de los depósitos lacustres, y sus correspondientes implicancias climáticas y ambientales aportan información sobre disponibilidad y ciclos de nutrientes, origen de los aportes sedimentarios, historia de la

vegetación, condiciones redox, etc. (Meyers, 2003; Castañeda & Schouten, 2011; O'Beirne *et al*, 2015).

La tasa de acumulación del carbono orgánico puede revelar la productividad biológica y las condiciones ambientales que afectaron la preservación de esa materia orgánica. La composición de la materia orgánica puede ser informativa respecto al origen de la producción primaria (por ejemplo, vegetación acuática versus terrestre), reflejando los factores climáticos (temperatura, humedad y vientos) de los cuales dependen (Boyle, 2002, Castañeda & Schouten, 2011). Las cantidades y contenidos isotópicos de la materia orgánica sedimentaria (carbono, nitrógeno, fósforo) aportan información respecto al ciclo de los elementos, permitiendo reconstruir cambios históricos en productividad del cuerpo de agua (Faganeli *et al.*, 1988)

La interpretación de los proxies geoquímicos puede ser dificultosa, debido a que el carácter lábil de los componentes geoquímicos los hace más susceptibles a la diagénesis (Boyle, 2002; Higginson, 2009). Por tal motivo, los indicadores geoquímicos suelen calibrarse en registros recientes, o bien en la elaboración de ecuaciones de transferencia para indicadores biológicos (Boyle, 2002). Asimismo, una aproximación multi-proxy puede compensar estos efectos post-depositacionales, contribuyendo a la interpretación paleoclimática y paleoambiental (Del Puerto, 2011).

La materia orgánica total expresada en porcentaje (%MOT) y la razón C:N son parámetros particularmente útiles porque ayudan a identificar el material que es depositado en el lago. El porcentaje de materia orgánica es sensible a una variedad de factores extrínsecos e intrínsecos de un sistema lacustre, por cuanto dependiendo del lago, la materia orgánica es controlada por entradas autóctonas, entradas alóctonas, o una combinación de ambos. En los lagos eutróficos, la MOT a menudo se relaciona estrechamente con la productividad. En los lagos oligotróficos y mesotróficos, la llegada de MOT está controlada por aportes terrestres. Asimismo, las perturbaciones asociadas a la cuenca tales como los usos agrícolas y/o forestales, son un importante aporte a los ingresos de materia orgánica a los sistemas lacustres. Las

alteraciones tienden a acelerar los procesos de erosión que resultan necesariamente en un aumento de los insumos minerales que disminuyen los valores de materia orgánica (Oldfield & Anderson, 2003).

La cantidad de Carbono y Nitrógeno de origen orgánico es una propiedad importante para determinar el contenido en materia orgánica del sedimento lacustre, y aporta información sobre la productividad del lago. El contenido en C y N existente en el sedimento es función de la producción orgánica (autóctona y alóctona), de la tasa de sedimentación clástica, y del decaimiento bacteriano. La relación C:N es un indicador de la fuente de origen de esta materia orgánica (Faganeli *et al*, 1988; Torres *et al*, 2012).

El contenido de C se puede representar como: a) CT (Carbono Total), b) COT (Carbono Orgánico Total), y c) CIT (Carbono Inorgánico Total). Como sus nombres indican, el CT representa el contenido en C total (tanto de origen orgánico como inorgánico), mientras que el COT y el CIT representan, respectivamente, el contenido en C de origen orgánico e inorgánico.

Por otro lado las relaciones C:N proporcionan información sobre el origen del material orgánico en los sedimentos del lago. Las algas son ricas en proteínas y pobres en celulosa, mientras que la materia orgánica de las plantas terrestres tiene la composición rica en celulosa y pobres en proteínas. En consecuencia, relaciones C:N (4-10) están asociados a aportes terrígenos y proporciones altas (> 20) a aporte algal (Meyers & Ishiwatari, 1993, Meyers, 2003). Esto último puede ser una forma útil para identificar fuentes relativas del origen de la MOT (Meyers, 1994; O'Beirne *et al*, 2015).

Las proporciones de isótopos de Carbono en los sedimentos lacustres constituyen un importante medio para inferir la ruta fotosintética de la vegetación dominante de la cuenca bajo los tipos C₃, C₄ y CAM (Meyers, 1994; Meyers, 2003).

El análisis de isótopos estables de Carbono en el Carbono presente en los sedimentos lacustre, ofrece un proxy que entrega importante información sobre las condiciones ambientales pretéritas tanto en ambientes lacustres como marinos (Meyers, 1997, 2003; O'Reilly, 2001; Del Puerto *et al*, 2016). El inconveniente principal de analizar la materia orgánica total es la falta de control de la fuente de los compuestos orgánicos analizados. En los casos en que el componente terrestre domina la entrada autóctona, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ son indicadores fiables del origen fotosintético predominante en la cuenca. Sin embargo, en los lagos con altas proporciones de carbono autóctono asociado a la producción de algas, la señal terrestre puede ser difícil de distinguir (Faganeli *et al*, 1988).

El análisis del isótopo de nitrógeno en sedimentos lacustres ha resultado una herramienta útil en la identificación de las fuentes de materia orgánica reportada en la matriz sedimentaria, proporcionando importante información sobre el pasado de la productividad biológica del lago (Meyers & Ishiwatari, 1993; Meyers, 2003; Meyers, 2006). Al respecto, la mayoría de las algas utilizan nitrógeno inorgánico disuelto, que tiene un valor isotópico más pesado que el nitrógeno disponible para las plantas terrestres, y como resultado el valor promedio de $\delta^{15}\text{N}$ de algas es de 8,5 ‰, mientras que los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de plantas terrestres promedio es de 0,5 ‰ (Meyers, 2003).

La relación isotópica de $\delta^{15}\text{N}$ también ha sido ampliamente utilizada como un parámetro para determinar las fuentes de materia orgánica y los procesos internos en cuerpos de agua. El nitrato es la forma más común de nitrógeno inorgánico disuelto, este no se utiliza mediante la fijación de N_2 en algas, mientras que las plantas terrestres utilizan un N_2 fijado por bacterias simbióticas en el suelo (Meyers, 2003). Los valores más altos de $\delta^{15}\text{N}$ típica (7-10%) de nitrato disuelto, en comparación con el N_2 atmosférico (0%), ayuda en la investigación de fuentes de nitrógeno y por tanto, las fuentes de materia orgánica (Das *et al.*, 2008).

Las diferentes fuentes de nitrógeno también pueden tener valores claramente negativos considerando como fuente de N en los sedimentos el aporte de del

escurrimiento de materia orgánica de origen terrígeno con importante aporte de material vegetal (Torres *et al*, 2012) donde el valor de $\delta^{15}\text{N}$ en las plantas da cuenta de la fuente de nitrógeno en los sedimentos (*e.g*, precipitación, suelo, fertilizante inorgánico, fertilizante orgánico y desechos animales) donde la demanda de la planta excede el nitrógeno disponible (Evans, 2001; Peterson & Fry, 1987). Por ejemplo, hay grandes efectos isotópicos de equilibrio (19-30 ‰) asociados con la volatilización del amoníaco, donde el amoníaco resultante tiene un valor $\delta^{15}\text{N}$ muy negativo debido posiblemente a la limitación de nutrientes en el ambiente, particularmente la limitación de fósforo, influye en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de las plantas. Esta limitación del fósforo se ha relacionado con la disminución de la demanda de nitrógeno de algunas plantas, lo que da como resultado valores negativos de las plantas $\delta^{15}\text{N}$ (Jones *et al.*, 2004).

OBJETIVOS

Objetivo General:

Efectuar un análisis en el marco de un gradiente ambiental y espacial (en un rango latitudinal y longitudinal) mediante registros sedimentarios lacustres superficiales a través del uso de indicadores geoquímicos como Carbono y Nitrógeno orgánico y su razón C:N e isótopos estables $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de 76 lagos situados a lo largo de la costa oeste de Sudamérica, evaluando potenciales variaciones en la composición geoquímica de los lagos por efectos de distribución espaciales (gradientes latitudinal o longitudinal) o variables climatológicas.

Objetivos Específicos:

1. Identificar las potenciales fuentes de variación espacial en el contenido de C y N orgánico y sus isótopos estables de la materia orgánica total en los sedimentos superficiales de los cuerpos lacustres analizados.
2. Identificar, en la información contenida en los sedimentos superficiales lacustres, potenciales forzantes derivados de efectos antropogénicos, en condiciones ambientales reconocidas en sus áreas de emplazamiento.
3. Evaluar el efecto ambiental y climatológico en la información contenida en los sedimentos superficiales lacustres, expresados en la composición geoquímica de éstos.
4. Identificar, mediante análisis de correspondencias y tendencias, relaciones funcionales entre los registros de proxies geoquímicos en sedimentos superficiales lacustres y las condiciones climatológicas en la costa Oeste de Sudamérica.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

En el presente estudio se realizó el análisis orgánico en muestras de sedimento superficial (core tops, 0-1 cm) de un total de 76 lagos de la costa Oeste de Sudamérica, correspondiente a sistemas lacustres presentes a lo largo del territorio de Chile.

Los lagos se distribuyeron latitudinalmente desde el paralelo 28° por el Norte hasta el paralelo 48° por el Sur, considerando además el gradiente longitudinal desde los 69° hasta los 73,8° Oeste, estos últimos correspondiente a los llamados lagos cordilleranos. El listado de los lagos y sus coordenadas se presentan en la Tabla N°2 y se representan geográficamente en la Figura 1.

Tabla 2. Listado de lagos analizados en el presente estudio. Se entrega la ubicación geográfica de cada lago y su altura respecto del nivel del mar (msnm)

Lago	Acrónimo	Latitud (S)	Longitud (W)	Altura (msnm)
Laguna Grande	LGR	28,7333333	69,904978	3236
Plateado	PLA	33,0774129	71,6387391	347
Batuco	BAT	33,2081018	70,8308558	488
El Peral	EPE	33,504458	71,606982	12
Lo Encañado	LEN	33,672032	70,133646	2492
Matanzas	MAT	33,762638	71,675485	11
Coleyuda	COL	33,7662928	71,6993247	16
Vichuquen	VIC	34,827388	72,058561	5
Ciénaga de name	CIE	35,7497288	72,2241991	136
Laguna del Maule	LDM	36,052834	70,508271	2165
Amarga	AMA	36,3125	71,4047222	734
Amargo A	AMB	36,3141	71,4033	766
Verde valiente	VVA	36,485	71,5017	1125
Baúl	BAU	36,6074	71,1847	1814
Fuentecillas A	FUE	36,613	71,204	1917
Chacayal	CHA	36,6833333	71,3	716
Avendaño	AVE	36,75861	72,44617	60
Pineda	PIN	36,82652	72,92623	26
Chica Sn-P	CHIC	36,849	73,084	26

Posada	POS	36,9273	73,134	18
La Señoraza	LSÑ	37,276452	72,700268	52
Mula	MUL	37,883333	71,366667	1422
El Barco	EBA	37,916667	71,266667	1260
Verde (Tol)	VER(T)	38,214	71,734	1385
Malleco	MAL	38,21515	71,68774	891
Jara	JAR	38,45256	71,2933	906
Verde (Pehuenco)	VER(P)	38,52	70,992	1762
Verde ABB	VER(A)	38,5233	70,99	1883
Negra PN Cong	NEG	38,5942	71,8108	690
Conguillio	CON	38,6328	71,6403	1125
Quepe	QUE	38,65	71,865	870
Galletue	GAL	38,6797	71,2872	1151
Captren	CAP	38,68936	71,62317	985
Verde PN Cong	VER©	38,6947	71,6114	980
Santa Olga	SOL	38,889	71,410	1521
Reloj	REL	38,9822	72,1822	312
Colico	COL	38,9853	71,8358	1075
Espejo	ESP	38,9953	72,1761	345
Tinquilco	TIN	39,1786	71,7286	810
Llancalil	LLA	39,2286	71,6256	750
Villarrica	VIL	39,2425	72,0925	215
Vaca Hundida	VHU	39,263842	71,707461	1344
San Jorge	SJO	39,30954	71,65168	980
Ancapulli	ANC	39,3344	71,7144	376
Menetué	MEN	39,336	71,714	380
Loncofilo	LON	39,36228	71,72708	370
Quillehue	QUIL(1)	39,5542	71,53658	1107
Quillehue	QUIL(2)	39,5569	71,5236	1110
Escondida	ESC	39,5744	71,5292	1215
Huinfuica	HUI	39,57948	71,53658	1278
Verde PN Villarrica	VER(V)	39,6008	71,5508	1640
Pellaifa	PELL	39,62572	71,92792	220
Neltume A	NEL(A)	39,80703	71,97694	198
Coipolafken	COI	40,23985	72,19488	388
Toro (Puy)	TOR(P)	40,76948	72,26903	718
Palmar A	PAL	40,79852	72,31799	644
Pastahue	PAS	42,3769	73,8269	153
Auquilda	AUQ	42,3794	73,8275	156
Natri	NAT	42,7961	73,8128	39
Coipue	COI	42,9914	73,7756	168

San Gilberto	SGI	44,44334	72,39229	23
Las Torres	LTO	44,80061	72,21333	267
Escondido	ESC(O)	44,81622	72,66844	13
La Esponja	LES	45,0987	72,08883	134
Lo Uno	LUN	45,127	71,578	938
La Esponja	LES(2)	45,164774	72,145483	155
Frio	FRI	45,3992	71,56363	512
Alta Chica	ACH	45,521612	72,693463	23
Mallines	MAL	45,531015	72,032231	700
Toro (Coy) A	TOR©	45,531424	71,854938	681
Thompson	THO	45,646433	71,792976	754
Blanca	BLA	45,7255	72,2092	388
Larga	LAR	46,16938	72,25159	310
Tranquilo	TRA	46,6239	72,78048	278
Cofre	COF	47,25606	72,51498	576
Ronchi	RON	48,161533	72,78878	275

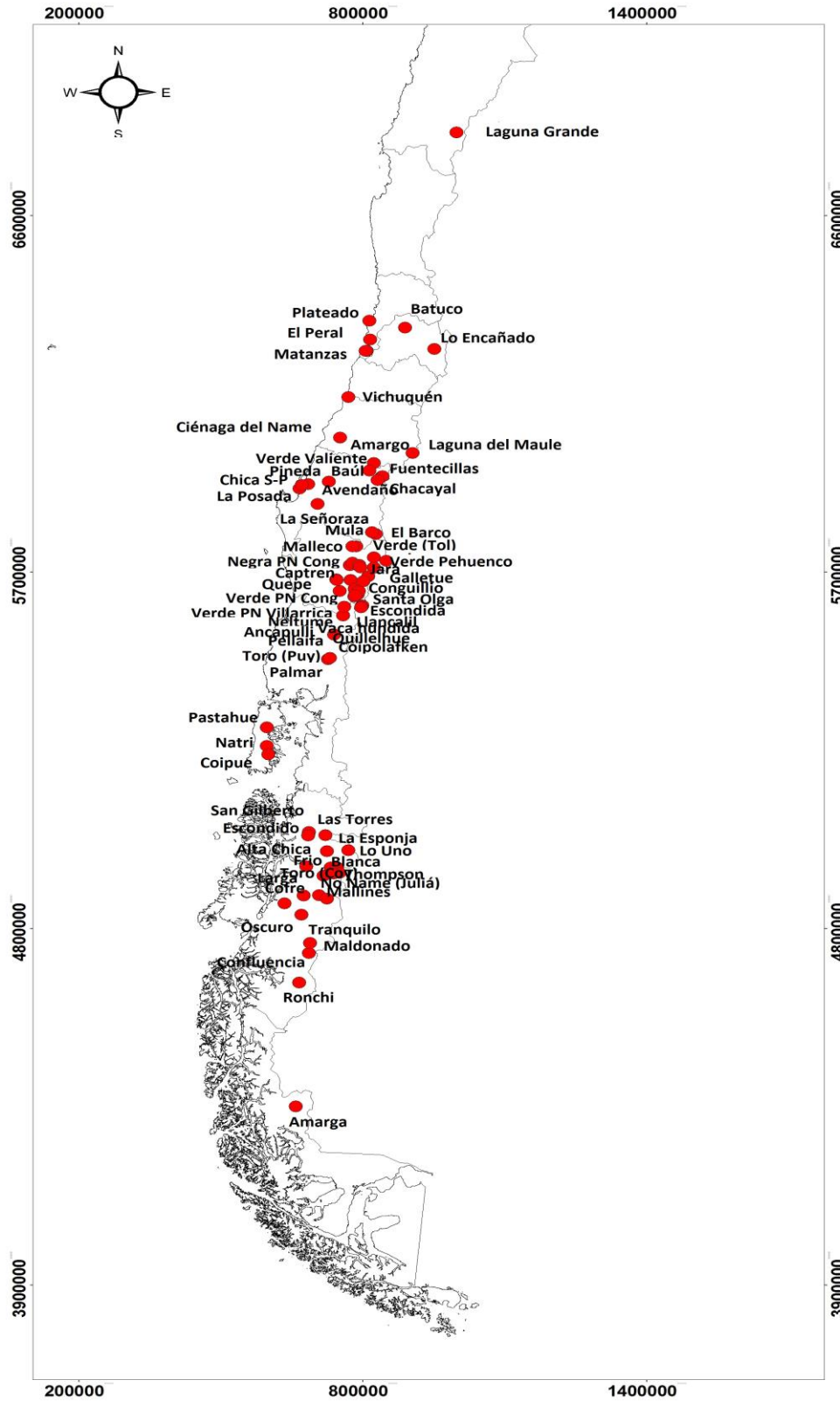


Figura 1. Localización geográfica de los lagos en estudio a lo largo del gradiente latitudinal de la costa oeste de Sudamérica.

Climatología

Para la obtención de los datos climatológicos, se realizó re-análisis de las grillas mensuales disponibles utilizando el Sistema de Reanálisis de Pronóstico Climático (CFSR de su sigla en inglés), basados en el modelo de previsión global NCEP. El período de estudio fue de enero 1979 a diciembre 2010, con una resolución horizontal de 0,5 grados. La región de estudio se extiende hacia el norte de 56° S a 20 °S, y hacia el oeste de 60 a 80 °O. El modelo CFSR fue diseñado y ejecutado como un sistema global, de alta resolución, acoplado al sistema de hielo superficial del complejo mar-atmósfera-océano-tierra para proporcionar la mejor estimación del estado de estos dominios acoplados durante este período (Saha *et al.*, 2010).

Las 15 variables que fueron descargados de la CFSR: albedo, la evaporación del agua del dosel, aire temperatura potencial, el flujo de la precipitación, el contenido de vapor de agua ambiente, la humedad de la relatividad, la cubierta de nieve, la temperatura del aire, el potencial de flujo de evaporación del agua, la cantidad de precipitación, el espesor de la nieve de superficie, tipo de suelo, contenido de humedad del suelo, la transpiración, la vegetación, finalmente en el presente estudio se consideró como variables climáticas solo la cobertura de nieve, la temperatura y la precipitación.

La representación espacial de las estaciones meteorológicas consideradas y la ubicación de los cuerpos lacustres considerados en el presente estudio se presentan en la Figura 2.

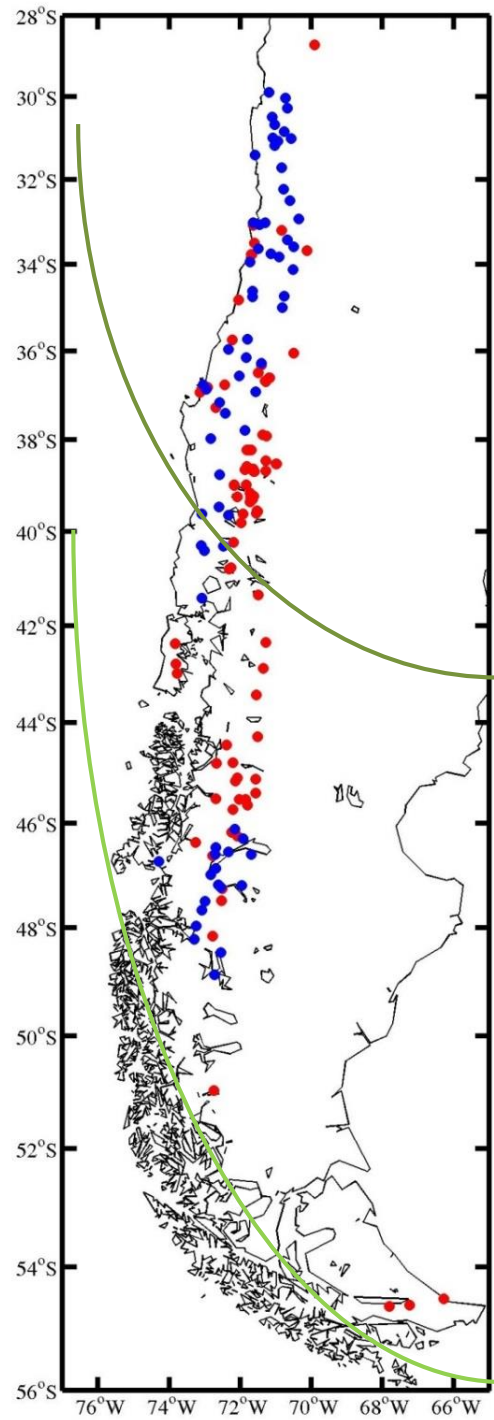


Figura 2. Estaciones Meteorológicas con información disponible utilizada en el reanálisis (puntos azules), y cuerpos lacustres incluidos en este estudio (puntos rojos). Las líneas verdes indican el área demarcada por el núcleo de los Vientos de la Deriva del Oeste

El análisis del ciclo estacional se define por las medias mensuales como: verano (enero-febrero-marzo), otoño (abril-mayo-junio), invierno (julio-agosto-septiembre) y primavera (octubre-noviembre-diciembre). Además, se obtuvo el punto de grilla más próximo a las posiciones de los lagos, de la CFSR, para todas las variables. Los datos son públicos y disponibles en línea (<http://rda.ucar.edu/pub/cfsr.html>).

El autor, desea agradecer al Señor Carlos Conejeros García, geofísico del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, quién fue encargado de obtener la climatología de los lagos en estudio a través del reanálisis descrito en los párrafos precedentes.

Análisis isotópico de los sedimentos

Las muestras de sedimento superficial (ca. 1 cm) fueron liofilizadas en el laboratorio y disgregadas en un mortero de ágata. Las muestras liofilizadas fueron sometidas a una fumigación ácida (HCl por 6 horas) para obtener las abundancias de Carbono Orgánico (C_{org}) y Nitrógeno Orgánico (N_{org}) para eliminar carbonatos.

El contenido de Carbono, Nitrógeno y la razón isotópica de carbono y nitrógeno ($\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$) de la materia orgánica del sedimento (MOT) se obtuvo a través de un analizador elemental (EA) Costech ECS 4010, conectado a un espectrómetro de masas de razón isotópica (IRMS de su sigla en inglés) Finnigan DELTA plus XP en el Laboratorio Regional de Isótopos Estables para Ciencias de la Tierra y Ambiental de la Universidad de Pittsburg (EEUU). Se analizó un total de 40 muestras en duplicado/triplicado de las 76 muestras superficiales lacustres, con una precisión $<0,5\%$ para carbono orgánico y $0,1\%$ para nitrógeno, excepto por 7 muestras en donde el carbono orgánico presentó una mayor variación entre repeticiones. Se reporta el valor promedio del análisis elemental. El $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$ en la notación usual (‰). La precisión de los estándares (USGS 40 and USGS 41) fueron de $<0,17\text{‰}$ para $\delta^{13}C$ y $<0,23\text{‰}$ para $\delta^{15}N$ respectivamente, y $<0,3\text{‰}$ para $\delta^{13}C$ and $<0,5\text{‰}$ para $\delta^{15}N$ para las réplicas.

Análisis estadístico y procesamiento de los datos

Con el objetivo de establecer correlaciones entre variables geoquímicas ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, C:N), los datos fueron normalizados mediante la función $Z = [(x-\bar{x})/\sigma]$ en la cual, x es el valor, \bar{x} es el promedio y σ es la desviación estándar de la variable. De esta forma, los datos presentan una distribución normal (gaussiana) y cada variable tiene media 0 y desviación estándar 1.

Sobre la base de los datos disponible y la relación geográfica y ambiental (climatología) se llevó a cabo un análisis correlación con el propósito de determinar la asociación entre variables geoquímicas entre las distintas cuencas lacustres. Un análisis de relación no paramétrica entre variables conocido como LOESS se utilizó para evaluar las relaciones funcionales (tendencia) entre variables climáticas y parámetros asociados a la materia orgánica (Jacoby, 2000). El LOESS es una regresión local ponderada entre pares de puntos cercanos y entre sí y que además ejecuta un ajuste suavizado de las curvas resultantes de pares de datos bajo un modelo no lineal (Jacoby, 2000). Adicionalmente, un análisis exploratorio de los datos permitió determinar el valor mínimo, el valor máximo, la media aritmética, la desviación estándar y así realizar análisis multivariados. La estadística multivariada considera el análisis de correlación y de agrupaciones (*Componentes Principales*) para los 76 lagos considerados en el estudio para lo cual se utilizó el en el módulo estadístico XLSTAT del paquete Microsoft Office.

IV. RESULTADOS

Climatología

Los resultados de la climatología y la tendencia efectuadas en función de las variables geográficas consideradas (latitud y elevación en el gradiente longitudinal) reportadas para las variables de la temperatura atmosférica (grados celsius), cobertura de nieve (m) y precipitación (kg/m^2) se presentan en la Figura 3.

Al respecto , junto con la reconstrucción espacial del reanálisis climatológico en el área de estudio, para el rango de tiempo considerado, se presenta la configuración estacional de las variables climatológicas consideradas con el objeto de establecer o examinar efectos estacionales en las variaciones de dichas variables. En consecuencia, los resultados de la Figura 3 presentan la variación estacional (verano, otoño, invierno y primavera) para la variables climáticas temperatura, precipitaciones y cobertura de nieve.

Una primera aproximación general de los resultados permiten identificar notables patrones que definen regiones climáticas y/o macrozonas con zonas climáticas que definen condiciones particulares para los lagos en estudio, los cuales junto con ratificar la variabilidad propia del espectro distribucional latitudinal y longitudinal, viene a corroborar los patrones que han sido descritos por efectos de los vientos de la deriva del Oeste.

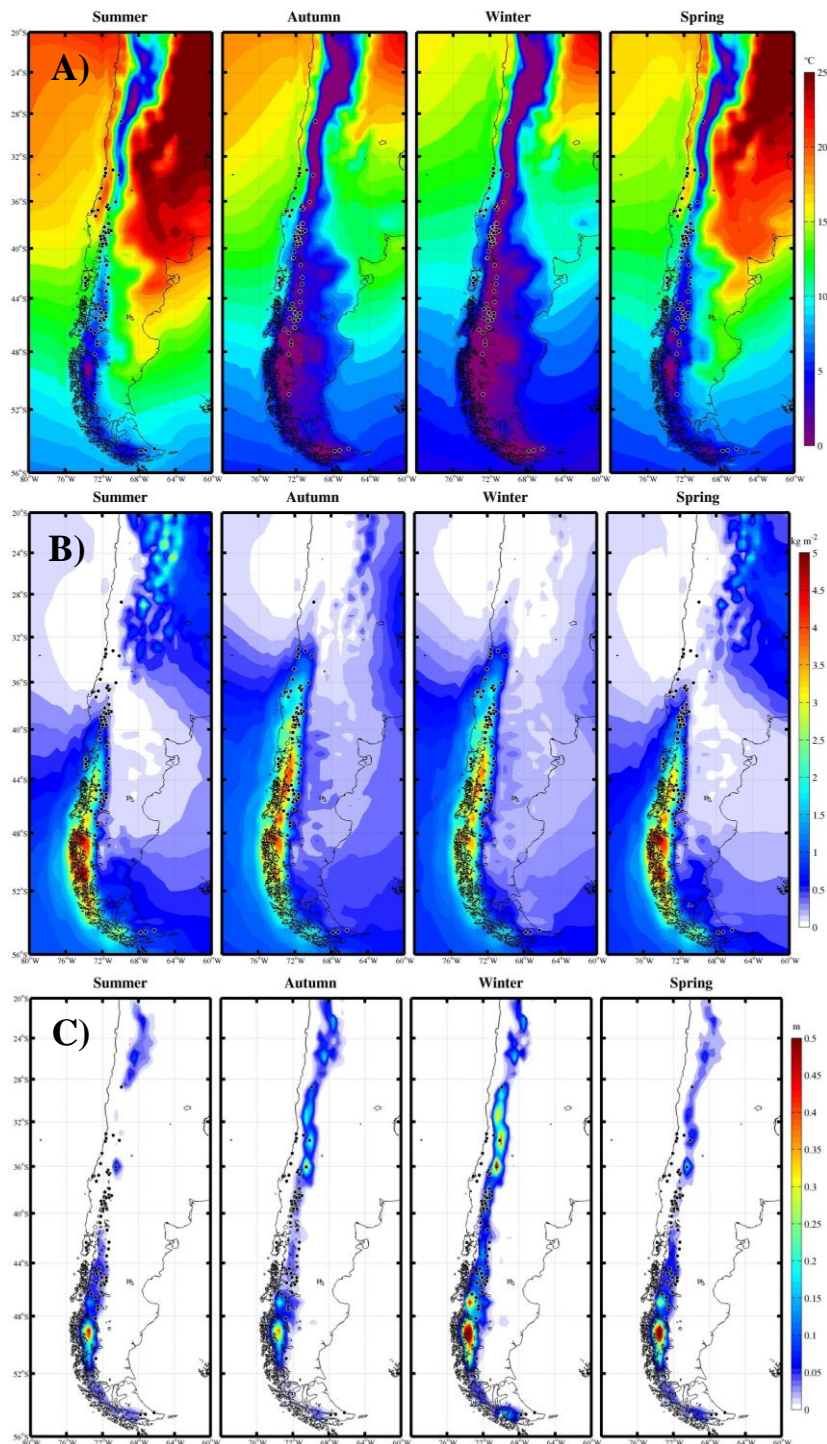


Figura 3. Hidroclimatología (1979-2010) en la costa oeste de América del Sur a través del reanálisis periodicidad mensual del Sistema de Reanálisis de Pronóstico Climático (CFSR), basado en el modelo de pronóstico global de NCEP y estaciones meteorológicas disponibles. Los puntos negros corresponden a los lagos en estudio. A) Temperatura; B) Precipitaciones y C) cobertura de nieve.

Los resultados de la climatología presentados en la Figura 3, muestra los principales núcleos climáticos que definen y estructuran los distintos gradientes a lo largo de la costa oeste de América del Sur. En el caso de la Temperatura (Figura 3A), el gradiente queda configurado en sentido Norte-Sur desde una región cálida a una región más fría a medida que aumenta en latitud con una marcada zona transicional en la zona centro sur a la altura de Chiloé, donde las temperaturas medias anuales alcanzan promedios cercanos a los 11°C previo al comienzo de la zona fría.

Consecuentemente con los gradientes térmicos, los perfiles de pluviosidad (Figura 3B) muestran el mismo patrón de correlación latitudinal desde zonas áridas por el norte hacia las zonas más lluviosas, cuyos núcleos de mayores precipitaciones se concentran en las zonas sur (hasta la Región de Aysén). Finalmente, el gradiente de cobertura nival (Figura 3C) más que a un gradiente latitudinal, muestra un claro patrón altitudinal, con la mayor concentración de núcleos con mayor cobertura de nieve en las zonas más altas de la cordillera de los Andes.

Los resultados permiten evidenciar claramente los patrones climáticos reconocidos como los southern westerlies winds (vientos de deriva del oeste) que se reporta al sur de los 40°S, con una marcada prevalencia durante todo el año un flujo bajo el océano adyacente y el continente, en conexión con una disminución de presión media en el polo (Figuras 3A y B). Donde se reporta como dicha región como una zona poblada de ciclones superficiales migratorios y anticiclones. En tal sentido, los vientos occidentales de media latitud se extienden hacia la troposfera alcanzando una velocidad máxima (la corriente de chorro) en la parte superior del cordón montañoso. El cinturón de westerlies (vientos de la deriva del oeste) es en gran parte simétrico sobre el hemisferio sur, debido a la ausencia grandes superficie de tierras al sur de 35°S, con un ciclo anual bastante regular (Nakamura & Shimpo, 2004; Rojas *et al*, 2009).

Proxies geoquímicos

Los valores los parámetros geoquímicos en los sedimentos para el total lagos analizados se entregan en la Tabla N°3 y los descriptores estadísticos en la Figura 4.

Tabla 3. Valores de los parámetros analizados en los sedimentos de los 76 lagos en estudio. Los valores en negrita representan valores cuya medición supera las 2 desviaciones estandar del total de las muestras analizadas.

	COT (%)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	NOT (%)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	C:N (mol/mol)
Laguna Grande	1,173	-24,520	0,058	2,200	23,585
Plateado	2,000	-27,860	0,156	5,970	14,951
Batuco	2,057	-	0,254	10,760	9,444
El Peral	22,120	-25,740	2,651	1,380	9,731
Lo Encañado	1,268	-26,160	0,133	-0,200	11,118
Matanzas	5,961	-25,340	0,779	3,100	8,924
Coleyuda	9,586	-	1,059	5,540	10,556
Vichuquen	2,324	-28,380	0,259	4,960	10,464
Ciénaga de name	6,263	-27,920	0,584	2,120	12,507
Laguna del Maule	2,238	-24,790	0,248	1,610	10,524
Amarga	9,490	-28,956	0,674	-	16,411
Amargo A	8,214	-28,605	0,546	-1,918	17,553
Verde valiente	18,160	-28,970	1,072	-2,190	19,756
Baúl	8,418	-24,956	0,730	-0,243	13,452
Fuentecillas A	4,994	-25,136	0,330	-0,046	17,624
Chacayal	7,544	-28,326	0,676	-0,442	13,008
Avendaño	3,694	-27,122	0,411	0,359	10,484
Pineda	4,257	-29,551	0,334	0,171	14,843
Chica Sn-P	3,436	-27,413	0,288	1,739	13,925
Posada	7,233	-27,605	0,656	0,655	12,863
La Señoraza	2,581	-31,179	0,268	4,144	11,248
Mula	9,319	-21,118	0,759	-1,046	14,311
El Barco	6,304	-25,348	0,563	-1,167	13,054
Verde (Tol)	21,501	-28,234	1,358	-4,254	18,458
Malleco	15,652	-27,797	1,092	-3,542	16,713
Jara	3,809	-29,174	0,417	-1,857	10,652
Verde (Pehuenco)	6,831	-29,086	0,588	-0,549	13,557
Verde ABB	4,684	-26,900	0,350	-0,930	15,607
Negra PN Cong	8,304	-32,110	0,878	-0,430	11,030
Conguillio	3,796	-23,790	0,381	-0,700	11,619
Quepe	10,495	-28,907	0,720	-2,831	17,007
Galletue	5,539	-28,460	0,514	0,790	12,567
Captren	7,837	-25,492	0,844	-2,477	10,824
Verde PN Cong	3,197	-27,600	0,309	-1,490	12,066
Santa Olga	44,740	-28,130	1,777	1,590	29,361

Reloj	12,960	-29,100	1,100	4,110	13,740
Colico	4,455	-26,890	0,354	0,230	14,676
Espejo	5,363	-24,880	0,510	-3,640	12,263
Tinquilco	18,770	-28,790	1,019	-1,680	21,481
Llancahil	16,230	-28,840	0,904	-2,160	20,937
Villarrica	0,846	-28,210	0,066	0,120	14,948
Vaca Hundida	34,278	-27,324	2,935	-2,234	13,621
San Jorge	17,619	-27,752	0,802	-4,220	25,633
Ancapulli	8,403	-30,450	0,950	0,980	10,315
Menetué	12,929	-29,489	0,891	-0,949	16,922
Loncofilo	12,621	-30,665	1,143	-0,336	12,881
Quillehue	7,439	-29,033	0,768	-3,648	11,289
Quillehue	8,834	-31,280	0,975	-2,490	10,566
Escondida	15,790	-28,690	0,843	-3,260	21,843
Huinifuca	8,041	-28,108	0,648	-3,489	14,466
Verde PN Villarrica	9,461	-25,180	0,758	-2,620	14,556
Pellaifa	6,951	-27,445	0,595	-0,259	13,613
Neltume A	3,697	-28,159	0,320	-2,183	13,483
Coipolafken	15,380	-29,977	0,808	-1,463	22,186
Toro (Puy)	14,332	-31,193	1,031	-4,248	16,217
Palmar A	9,368	-30,182	0,719	-2,728	15,187
Pastahue	28,270	-28,690	2,520	6,760	13,083
Auquilda	12,580	-28,380	1,068	6,510	13,737
Natri	20,240	-27,900	1,710	2,590	13,803
Coipue	10,740	-30,180	0,941	3,440	13,310
San Gilberto	4,255	-31,020	0,338	0,250	14,681
Las Torres	4,356	-28,730	0,334	1,450	15,209
Escondido	5,669	-28,170	0,290	-1,540	22,797
La Esponja	9,224	-28,300	0,692	0,620	15,545
Lo Uno	9,956	-26,634	1,050	2,705	11,062
La Esponja	13,030	-27,409	1,030	0,262	14,747
Frio	6,323	-28,930	0,677	2,480	10,892
Alta Chica	9,046	-31,340	0,768	0,161	13,731
Mallines	16,128	-28,979	1,397	-3,209	13,463
Toro (Coy) A	1,308	-28,347	0,171	2,852	8,894
Thompson	7,964	-27,949	0,897	3,940	10,356
Blanca	8,275	-31,525	0,841	2,764	11,470
Larga	8,472	-28,770	0,724	1,520	13,646
Tranquilo	1,486	-28,556	0,124	-	13,976
Cofre	1,808	-29,271	0,123	-	17,202
Ronchi	12,288	-25,880	1,035	0,187	13,843

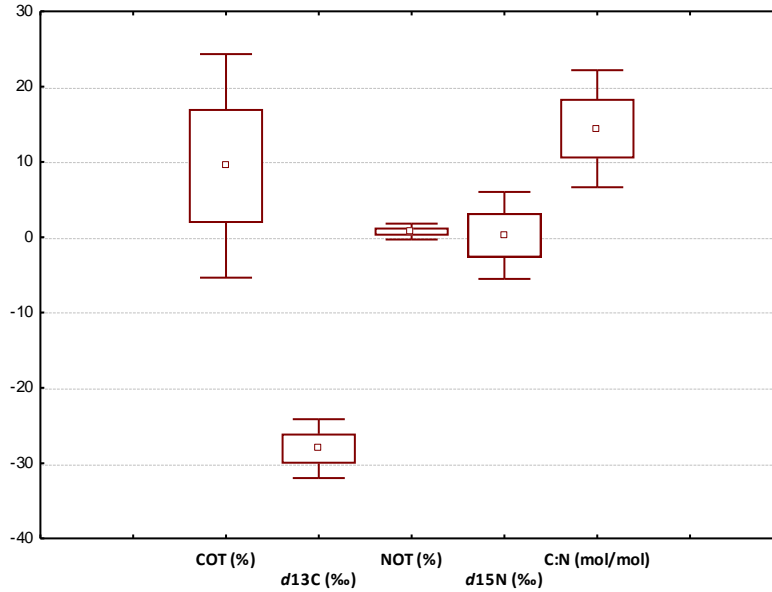


Figura 4. Grafico Box-Plot para los descriptores estadísticos de los parámetros en los sedimentos lacustres. Los gráficos muestran valores totales para todo el rango de lagos analizados

La Tabla 3 reporta el valor promedio de cada uno de los parámetros geoquímicos del total de cuerpos lacustres considerados en el presentes estudio, cuyos descriptores de tendencia central y de dispersión se presentan en la Figura 4, donde se observa que el rango de variación de los isótopos estables de C y N, y su relación con la razón C:N, donde se muestra el rango de registro de los isótopos geoquímicos, con valores entre -31 y -21 (‰) para el $\delta^{13}\text{C}$ y de -4,25 y 10,76 (‰) para el $\delta^{15}\text{N}$, la razón C:N presentó un rango entre 8 y 30 (mol/mol) en su relación con las variables isotópica (Figura 5).

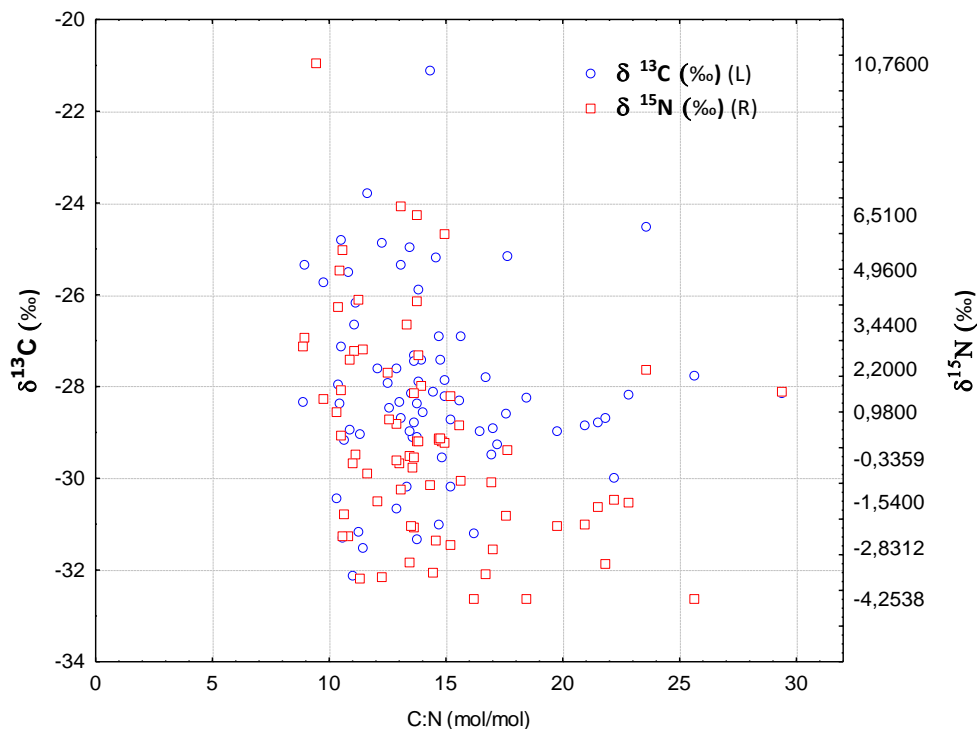


Figura 5. Valores generalizados de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ respecto de la relación C:N

Los valores de C:N en los sedimentos lacustres, son indicadores de potenciales fuentes de origen de la materia orgánica en los ecosistemas, sean éstos de fuentes alóctonas o autóctonas (Wetzel, 1983; Meyers et al., 1998). En tal sentido los valores C:N de la materia orgánica terrestre tiende a presentar valores variables, generalmente entre 10 y 40, aunque dichos valores, en general, son mayores a 20 (Herczeg *et al.*, 2001). Los valores reportados en algas lacustres y plantas acuáticas presentan valores típicos más bajos que en plantas terrestres, y en aquellos casos como el reportado en la Figura 4, donde el rango se registró entre los 10 y 20, representan una condición de mezcla de material sedimentario proveniente de plantas acuáticas y plantas superiores, y valores >20 , indica mayores proporciones de plantas superiores (Meyers, 1994).

Con el objeto de identificar patrones o gradientes espaciales que permitan agrupar los datos como condición forzante, se procedió a efectuar una exploración de tendencias entre las variables climatológicas en función de la latitud y la altitud de los lagos cuyos resultados se presentan en las Figuras 6 y 7 respectivamente.

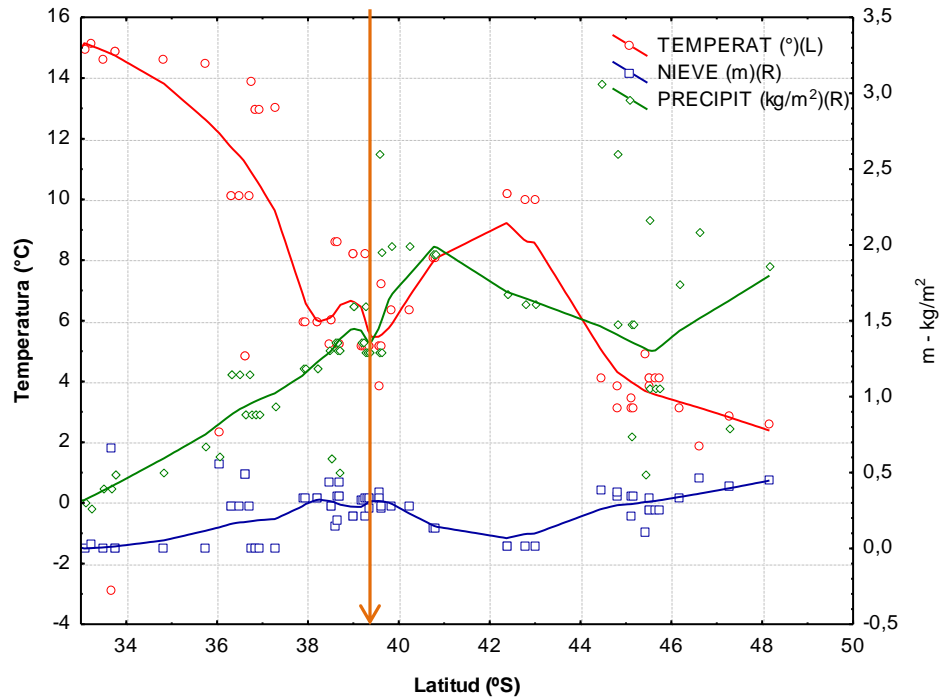


Figura 6. Representación gráfica de las variables climáticas: Cobertura de nieve, Temperatura y Precipitación, en el rango latitudinal de la zona estudiada. La flecha indica el punto de flexión seleccionado (40°S) como límite para la categoría de lagos norte y sur.

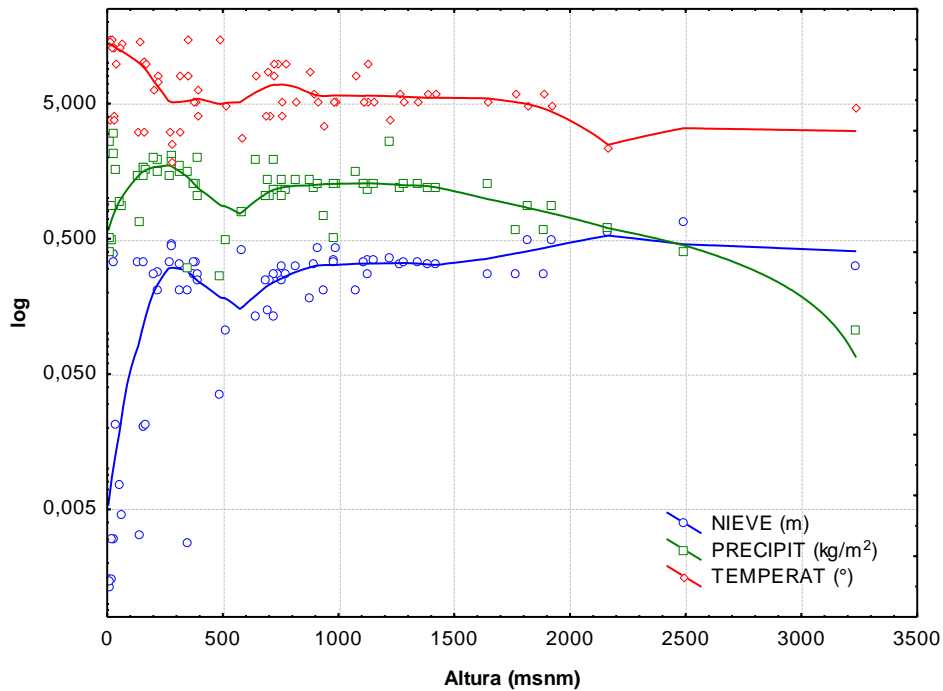


Figura 7. Representación gráfica de las variables climáticas: Cobertura de nieve, Temperatura y Precipitación, en el rango altitudinal de la zona estudiada. El eje de

las ordenadas se presenta en escala logarítmica, para reducir la variabilidad y dispersión de los datos entre las tres variables.

Como se muestra en la Figura 6, es posible identificar un punto de inflexión en la curva de las variables climatológicas respecto del rango latitudinal, donde a partir de los 40°S es posible detectar un cambio de tendencia en la relación entre ambas variables. En efecto a partir de dicha latitud, especialmente en las variables temperatura y la precipitación, se produce un cambio en el patrón de tendencia, con una notable disminución en la temperatura a partir de dicha latitud, y secundariamente en el caso de la precipitación a partir de dicho punto se produce un aumento en las precipitaciones. Lo anterior permite establecer un criterio de agrupación para el tratamiento posterior de los datos bajo el criterio de condición “Norte” y “Sur” con patrones climáticos distintivos en ambos casos.

Respecto de la condición de altitud, los resultados presentados en la Figura 7 no permiten identificar un criterio claro de agrupación, observándose una uniformidad de las variables, en función del eje longitudinal y particularmente de la altitud. Por lo anterior, en el presente estudio se estableció como criterio la identificación de aquellos lagos que se registran en altitudes menores a los 200 metros como lagos de valles o costeros y aquellos que se reportan sobre dicha altura como lagos de montaña.

Los resultados del contenido de materia orgánica expresada en los contenidos de Carbono Orgánico Total (%) y Nitrógeno Orgánico Total (%), se efectuaron considerando el gradiente latitudinal de los lagos analizados, para lo cual, y con el objeto de descartar el sesgo inferido por la presencia de macrozonas latitudinalmente muy extremas, se procedió a efectuar el procesamiento segregado de los datos diferenciados por zona norte (desde los 28°S hasta los 40°S aproximadamente) y en una zona sur (desde los 40°S hasta los 50°S aproximadamente). El análisis resultante del comportamiento de los parámetros COT y NOT se presentan en las Figuras 8 A) y B) respectivamente, donde se presenta el gráfico para ambos parámetros, para el total de los datos y lagos analizados.

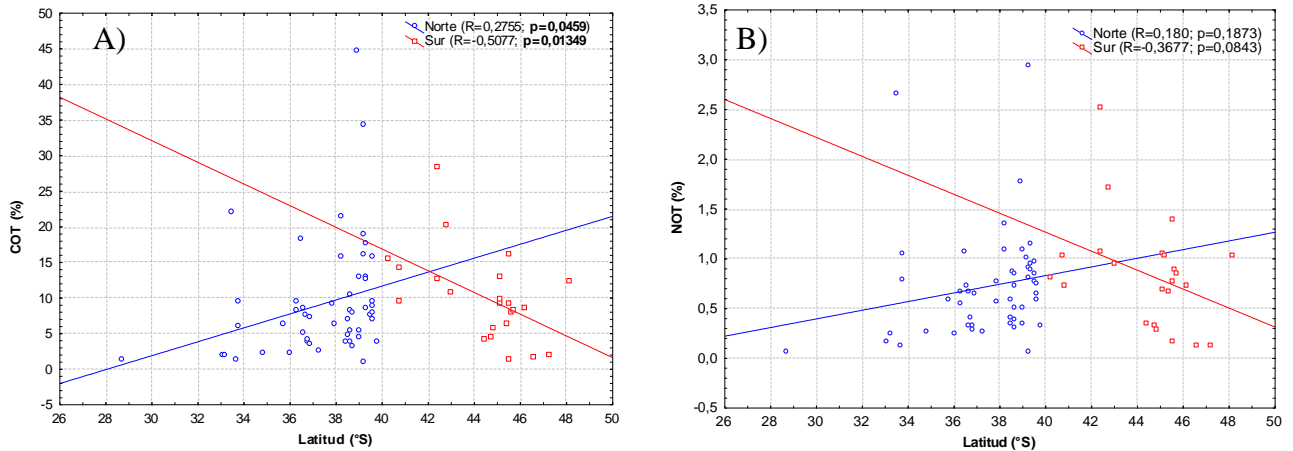


Figura 8. Contenido de Carbono Orgánico Total (A), Nitrógeno Orgánico Total (B, para el total de los lagos analizados (N=76) según gradiente latitudinal, según macrozonas Norte (azul) y Sur (rojo).

Los datos muestran tendencias y correlaciones inversas en ambas zonas, previamente definidas, donde en la zona norte, para ambos parámetros se presenta una correlación lineal positiva, dando cuenta de un aumento del contenido de materia orgánica en los sedimentos lacustres (expresado en los niveles materia orgánica de COT y NOT) en el gradiente latitudinal hasta aproximadamente el paralelo 40°S. Por lado el correspondiente análisis de la zona sur, a diferencia de la zona norte se aprecia que a partir de dicha latitud se produce una disminución del contenido de materia orgánica conforme se avanza a la zona más austral.

Luego, los resultados de las relaciones entre el gradiente latitudinal y la composición isotópica de C y N presente en los sedimentos se presentan en las Figuras 9 A) y B) respectivamente, donde es posible observar, para ambos parámetros, una condición distintiva en la zona norte respecto a la zona sur, con una tendencia general de disminución del contenido de los isótopos $\delta^{13}\text{C}$ (‰) y $\delta^{15}\text{N}$ (‰).

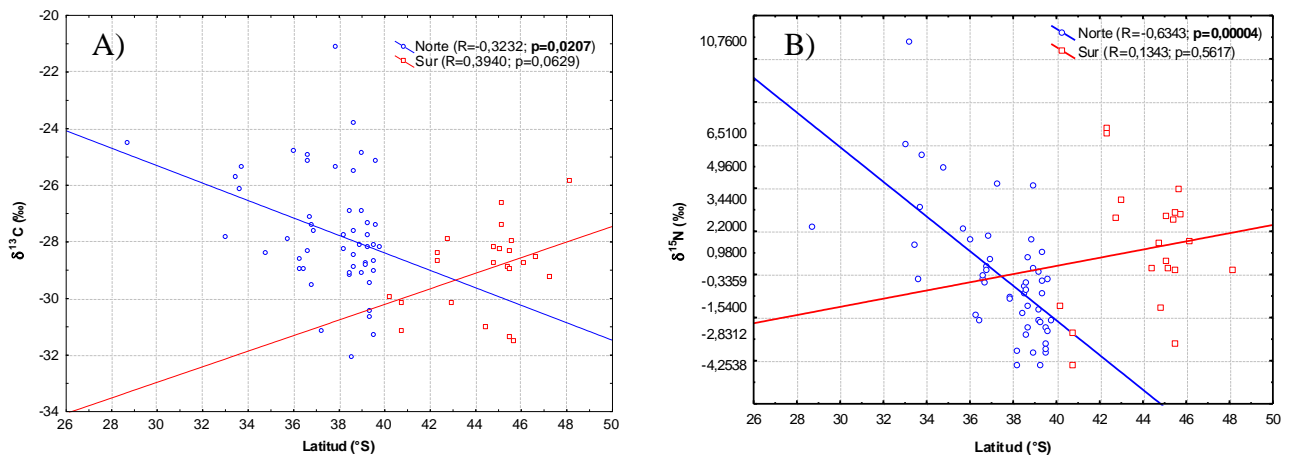


Figura 9. Contenido de Isótopo de Carbono (C) e Isótopo de Nitrógeno (D), para el total de los lagos analizados (N=76) según gradiente latitudinal, según macrozonas Norte (azul) y Sur (rojo).

Los resultados del análisis de la variación latitudinal de las variables geoquímicas en función de los forzantes climáticos para el COT, NOT, los compuestos isotópicos $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ y la razón C:N se presentan en las Figuras 10 a la 12 respectivamente.

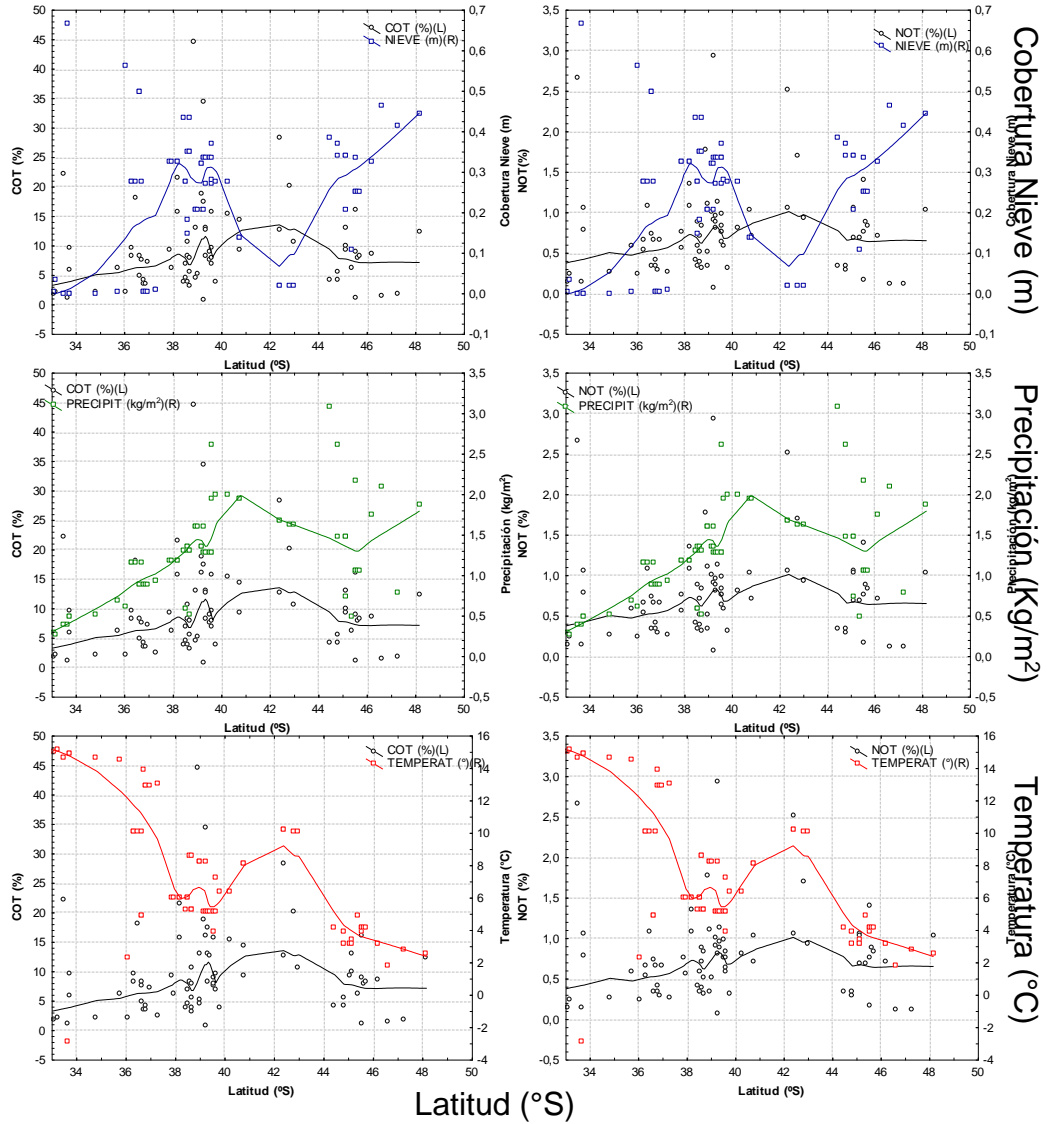


Figura 10. Variación latitudinal del contenido de Carbono orgánico total (columna izquierda) y Nitrógeno orgánico total (columna derecha) en relación a las variables climatológicas: Cobertura de Nieve (superior), Precipitación (medio) y Temperatura (inferior).

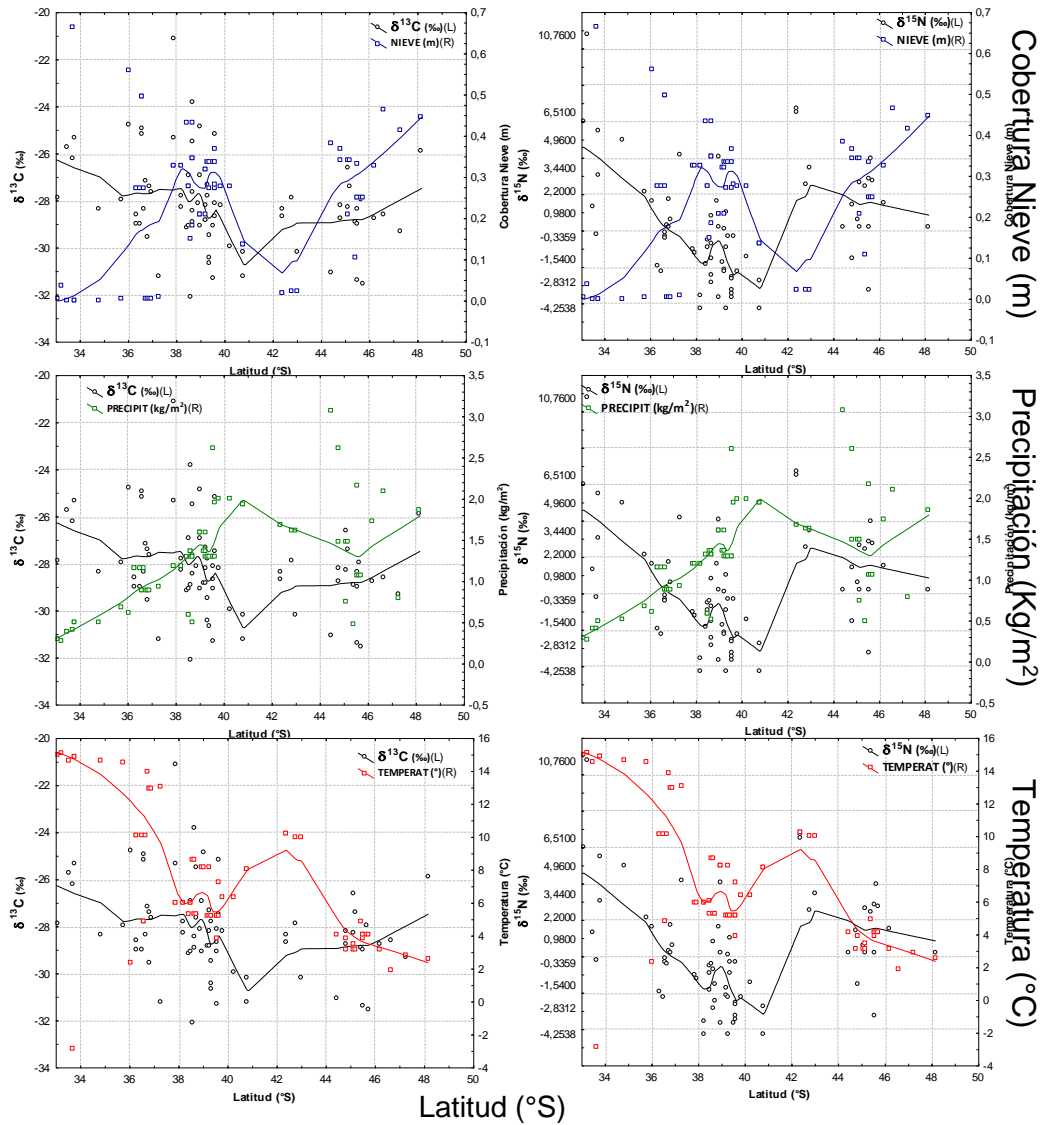


Figura 11. Variación latitudinal del contenido de Isótopo de Nitrógeno ($\delta^{13}\text{C}$) (columna izquierda) e Isótopo de Nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) (columna derecha) en relación a las variables climatológicas: Cobertura de Nieve (superior), Precipitación (medio) y Temperatura (inferior).

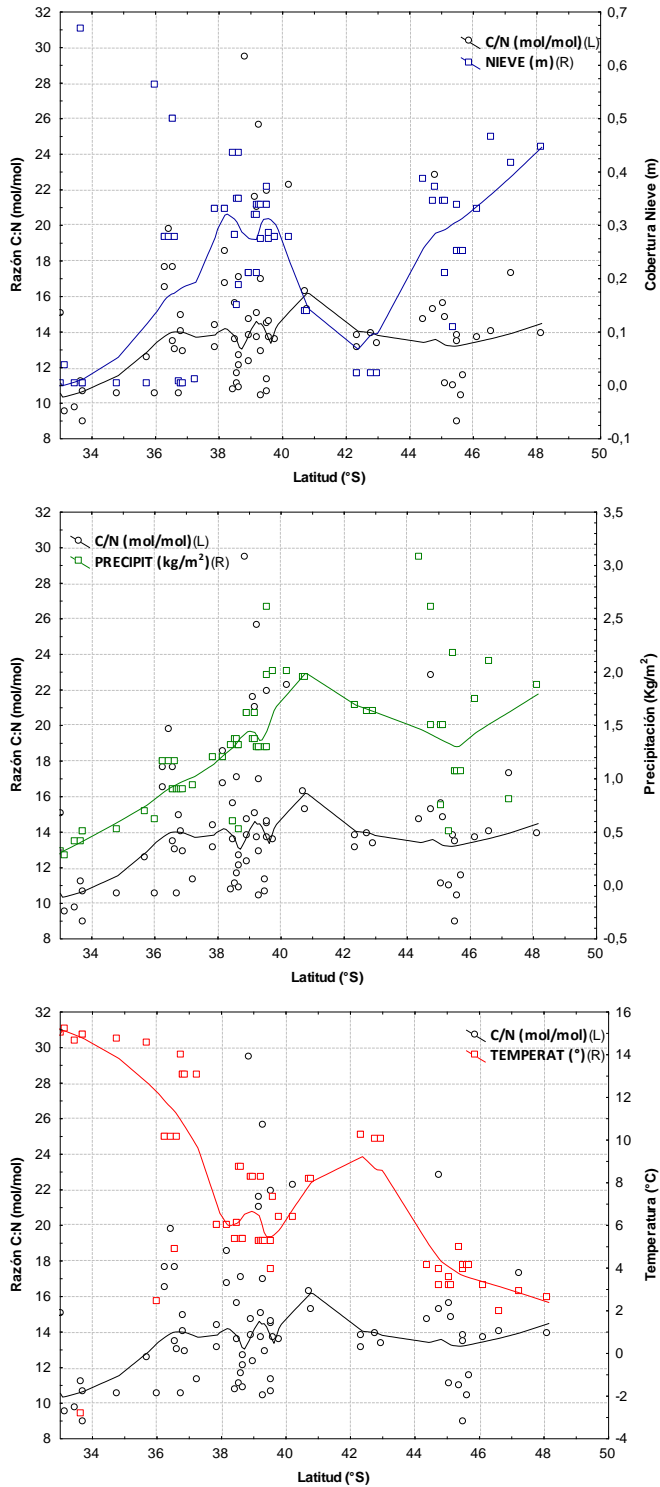


Figura 12. Variación latitudinal de la razón $C_{org}:N_{org}$ (C:N) en relación a las variables climatológicas: Cobertura de Nieve (superior), Precipitación (medio) y Temperatura (inferior)

El análisis del comportamiento espacial (gradiente latitudinal) de las variables geoquímicas respecto a las variables climáticas: Cobertura de nieve, precipitación y temperatura presentan notables patrones de relación y tendencias en el eje latitudinal, siendo notable el punto de inflexión que se produce en algunas variables a partir de los 40°S.

En relación al contenido del Carbono orgánico total, los resultados muestran que en la zona norte existe una buena correlación en el comportamiento del COT respecto de las 3 variables climáticas analizadas, donde se detecta un leve aumento de norte a sur de COT hasta aproximadamente los 40°S, luego de lo cual se produce una tendencia a la disminución de la COT hacia el sur. Esta tendencia es marcadamente notoria respecto de las variables precipitación y temperatura (Figura 10), donde la tendencia tiene un comportamiento isométrico entre ambas variables. Respecto de la cobertura de nieve, precisamente hacia el sur se detecta un comportamiento inverso, es decir el aumento en la cobertura de nieve se produce una disminución del contenido de COT en los sedimentos superficiales.

El Nitrógeno orgánico total presente en los sedimentos, presenta un comportamiento latitudinal dispar respecto a las variables climáticas (Figura 10), detectándose un cambio de patrón en la tendencia del NOT a partir de los 40-41°S. En el caso de la relación latitudinal del NOT respecto de la cobertura de nieve, si bien se observa una relación proporcional en la zona norte, a medida que avanza hacia el sur, particularmente a partir de los 41°S los niveles de NOT tienden a disminuir conforme aumenta la cobertura de nieve. Respecto de las precipitaciones, se registran un aumento sostenido del NOT hacia el sur, conforme aumentan las precipitaciones, situación que cambia a partir de los 40-41°S donde se registra una disminución del contenido de NOT al igual que una leve disminución de las precipitaciones. Luego, respecto de la variable temperatura, ésta claramente muestra un descenso sostenido latitudinal, estableciéndose una relación inversa respecto al contenido de NOT, el cual presenta un aumento en el gradiente latitudinal, condición que es sostenida solo hasta

los 40°S, a partir del cual se observa una disminución del NOT registrado en los sedimentos.

Respecto a los parámetros isotópicos, el gradiente latitudinal da cuenta de relaciones inversas entre los isótopos de N y C, y las variables climáticas para ambos casos, condición que no se mantiene a partir de los 40°S como ha sido señalado para las otras variables geoquímicas señaladas precedentemente (Figura 11).

La razón C:N presenta en general un comportamiento bastante relacionado con la temperatura y las precipitaciones con aumento hacia la zona sur y la disminución a partir de los 40°S. Respecto de la cobertura de nieve sin embargo, se produce un cambio inverso a partir de dicho punto donde la razón C:N disminuye conforme aumenta la Cobertura nival (Figura 12).

Respecto al potencial efecto del componente altitudinal sobre la composición geoquímica de los sedimentos lacustres, en la Figura 13, se presenta la relación entre cada uno de los parámetros analizados y la variable precipitación.

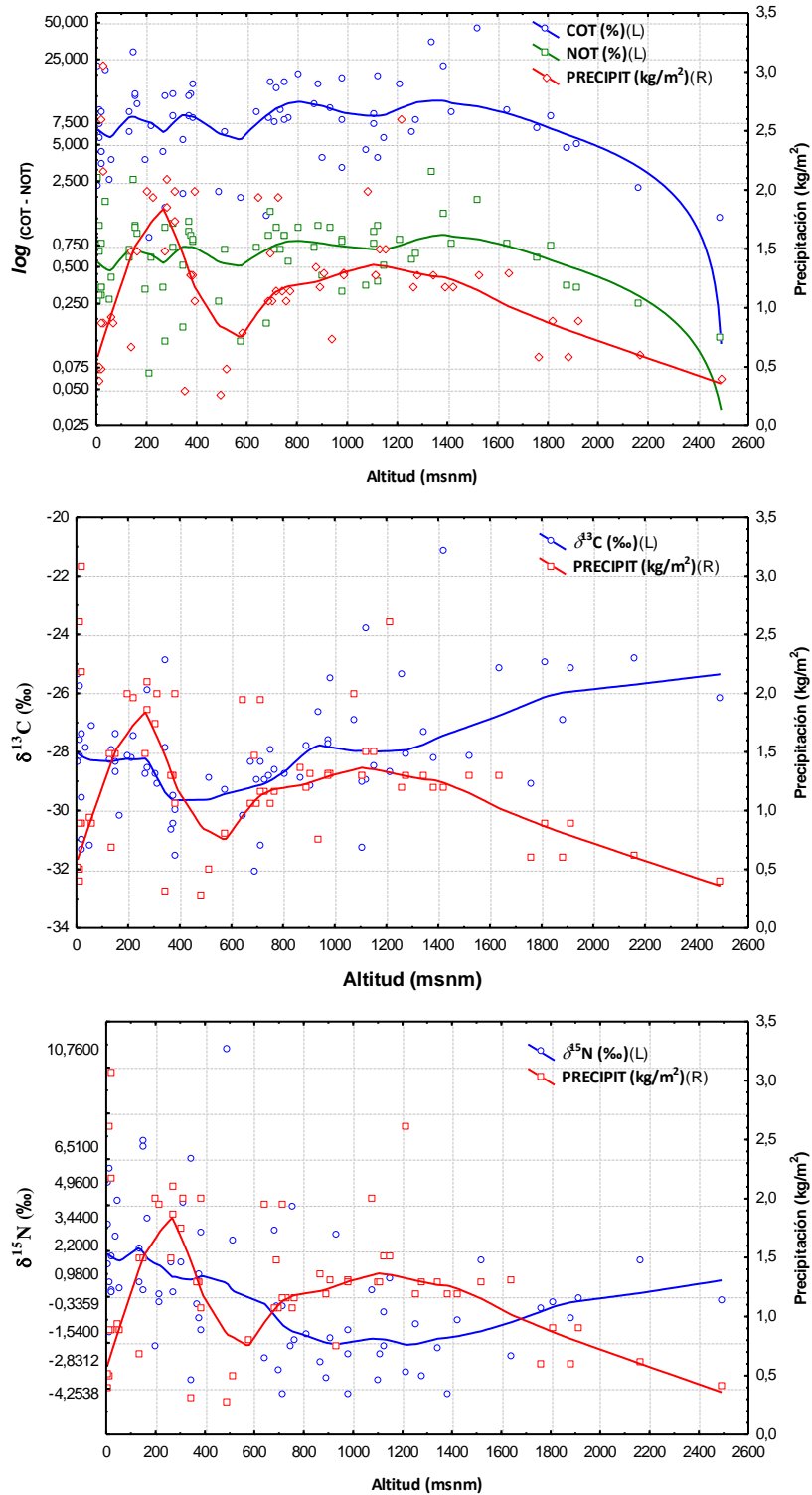


Figura 13. Variación altitudinal de las variables geoquímicas en relación a la variable climatológica Precipitación (kg/m²). Se presentan los datos de COT y NOT (superior), δ¹³C (medio) y δ¹⁵N (inferior)

En el análisis de la gradiente altitudinal de la precipitación es posible identificar un primer máximo a los 200 metros a partir del cual se produce un descenso en las precipitaciones para aumentar nuevamente en altitud hasta alcanzar un nuevo máximo, aunque menor en el rango de los 1200 metros sobre el nivel del mar. Respecto al contenido de materia orgánica presentan un leve aumento en el gradiente altitudinal hasta los 1200 m a partir del cual se produce un descenso tanto del COT como del NOT. Respecto del contenido del isótopo de C, este se mantiene en niveles constante, independiente de la precipitación, para aumentar por sobre los 1200 m de altitud, contrario a lo que ocurre con la precipitación. Respecto del isótopo del N, éste presenta un descenso a medida que aumenta en altura de los lagos para aumentar a partir de los 1200 m.

Luego, con el objeto de establecer patrones de agregación o comportamientos distribucionales entre los sistemas lacustres en estudio, se procedió a realizar el análisis multivariado de componentes principales (ACP) con el objeto de identificar cluster entre lagos con patrones similares, determinados por los respectivos contenidos de materia orgánica expresados en los contenidos de COT, NOT, $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, de los sedimentos lacustres superficiales, cuyos resultados permitieron identificar tres principales agrupaciones lacustres con atributos geoquímicos similares (Tabla N° 4).

Tabla 4. Contribuciones porcentuales de los factores del análisis multivariado (N=76).

	F1	F2	F3	F4
d13C (‰)	0,025	0,761	99,181	0,033
EA-TON	0,006	0,001	0,032	99,962
d15N (‰)	16,372	83,088	0,539	0,000
C:N				
(mol/mol)	83,597	16,150	0,248	0,005

Tabla 5. Contribuciones porcentuales de los factores del análisis multivariado (N=76). Los resultados que corresponden a los centroides de las categorías se muestran en la parte inferior de la tabla.

	F1 (62,02%)	F2 (23,31%)
Laguna Grande	7,528	5,147
Plateado	-1,838	5,405
Batuco	-8,807	7,577
El Peral	-4,768	-1,055
Lo Encañado	-2,873	-1,907
Matanzas	-6,223	0,149
Coleyuda	-5,672	3,268
Vichuquen	-5,523	2,727
Cienaga de name	-2,511	0,920
Laguna del Maule	-4,169	-0,616
Amarga	1,832	0,876
Amargo A	3,747	-0,673
Verde valiente	5,881	-0,003
Baúl	-0,736	-1,112
Fuentecillas A	2,998	0,759
Chacayal	-1,009	-1,178
Avendaño	-3,662	-1,568
Pineda	0,437	0,224
Chica Sn-P	-1,071	1,098
Posada	-1,596	-0,300
La Señoraza	-4,432	2,542
Mula	0,314	-1,834
El Barco	-0,721	-2,080
Verde (Tol)	5,520	-2,469
Malleco	3,628	-2,560
Jara	-2,579	-3,341
Verde (Pehuenco)	-0,452	-0,989
Verde ABB	1,540	-0,704
Negra PN Cong	-2,761	-1,632
Conguillio	-2,248	-2,368
Quepe	3,624	-1,698
Galletue	-1,910	-0,221
Captren	-2,226	-4,158
Verde PN Cong	-1,461	-2,577
Santa Olga	13,126	7,232
Reloj	-2,166	3,334
Colico	0,219	-0,021
Espejo	-0,451	-4,694
Tinquilco	7,249	1,140
Llançalil	6,946	0,488
Villarrica	0,531	0,102

Vaca Hundida	0,278	-2,647
San Jorge	12,055	0,402
Ancapulli	-4,011	-0,778
Menetué	2,795	0,034
Loncofilo	-1,128	-0,927
Quillehue	-1,271	-4,730
Quillehue	-2,364	-3,768
Escondida	8,217	-0,164
Huinifuca	1,553	-3,389
Verde PN Villarrica	1,239	-2,816
Pellaifa	-0,544	-0,845
Neltume A	0,125	-2,590
Coipolafken	7,823	1,724
Toro (Puy)	3,514	-3,107
Palmar A	1,938	-2,224
Pastahue	-3,835	5,453
Auquilda	-3,152	5,457
Natri	-1,507	1,871
Coipue	-2,272	2,644
San Gilberto	0,280	0,359
Las Torres	0,242	1,465
Escondido	8,380	1,740
La Esponja	0,880	0,807
Lo Uno	-4,085	0,762
La Esponja	0,285	0,084
Frio	-4,116	0,688
Alta Chica	-0,544	-0,075
Mallines	0,543	-3,459
Toro (Coy) A	-6,107	0,171
Thompson	-5,211	1,718
Blanca	-3,661	1,406
Larga	-1,212	0,906
Tranquilo	-0,405	-0,139
Cofre	2,556	1,220
Ronchi	-0,535	-0,482
Centroide (montaña)	0,591	-0,274
Centroide (valle)	-3,153	1,460

Con el objeto de precisar aquellas componentes que mejor dan cuenta de la distancia entre los puntos se efectuó un análisis de Componentes Principales con el objeto de determinar los valores de los vectores (eigenvalues) y la varianza que dan mayor cuenta de las agrupaciones cuyos resultados se resumen en la Tabla 4.

En la identificación de los componentes principales, para efectos de cálculos se conservaron sólo aquellos componentes o factores (F) que recogen la mayor parte de la variabilidad, para lo cual se utilizó el tipo de escalamiento “distance biplot” hecho que permite representar los datos según las dos dimensiones o ejes factoriales que explicaron sobre el 85% de la varianza, pudiéndose identificar entonces grupos naturales entre las observaciones, con lo cual se revelaron patrones de lagos que comparten atributos ambientales particulares a través de las características geoquímicas de sus sedimentos, ponderado por el aporte de cada uno de los parámetros en la Tabla 3 en los planos cartesianos de los componentes principales (Figura 14)

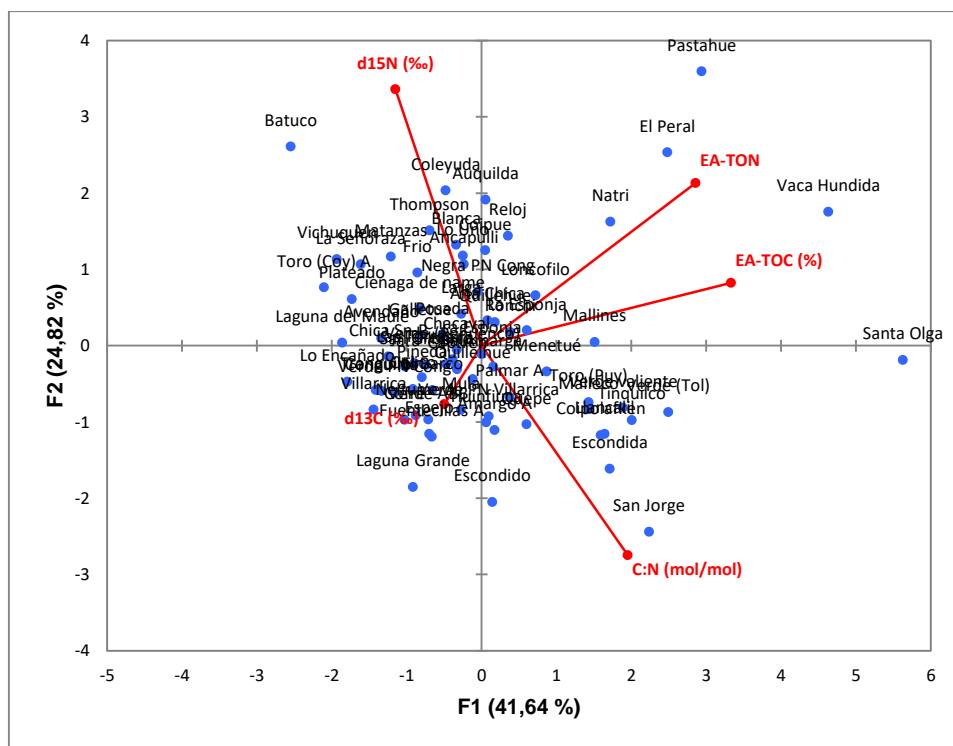


Figura 14. Análisis de Componentes Principales (ACP), para el total de lagos analizados (N=76) considerando los contenidos de materia orgánica en los sedimentos superficiales.

Los resultados presentados en la Figura 14, muestran una tendencia a la segregación de puntos en torno a los respectivos de los ejes que definen los componentes principales, no distinguiendo patrones de agrupaciones y/o identificación de grupos de

puntos (lagos) homogéneos entre sí que permitieran identificar grupos característicos en la nube de puntos. Sin embargo, también es posible detectar la presencia de lagos, que sin necesidad de mostrar patrones de agrupación entre ellos, presentan una condición de “outliers” o que presentan características propias que permiten desagregarse de las generalidades de lagos restantes considerados en el estudio. En efecto, estos lagos distintivos corresponden a los lagos: Santa Olga, Vaca Hundida, El Peral, Verde (Tol), Verde Valiente, Pastahue, Natri y Mallines, los cuales presentan como patrón característicos altos contenidos de materia orgánica, principalmente COT según se reporta en la Tabla N°3, y que son aquellos parámetros que definen la mayor varianza del componente 1 (F1).

Luego, con el objeto de identificar posibles asociaciones o grupos de lagos con atributos especiales se procedió a efectuar un reanálisis de componentes principales descartando el efecto del contenido de COT con el propósito de eliminar la sobrevaloración de dicho parámetro en la ponderación de los vectores propios de aquellos lagos que presentaron valores con condiciones excepcionales debido al alto contenido autóctono o alóctono de COT en sus sedimentos, cuyos resultados categorizados por su ubicación longitudinal se muestran en la Figura 15, donde si bien la tendencia general muestra la homogeneidad de puntos en torno a ambos componentes principales, es posible distinguir puntos con asociaciones características definidas por su composición geoquímica de sus sedimentos.

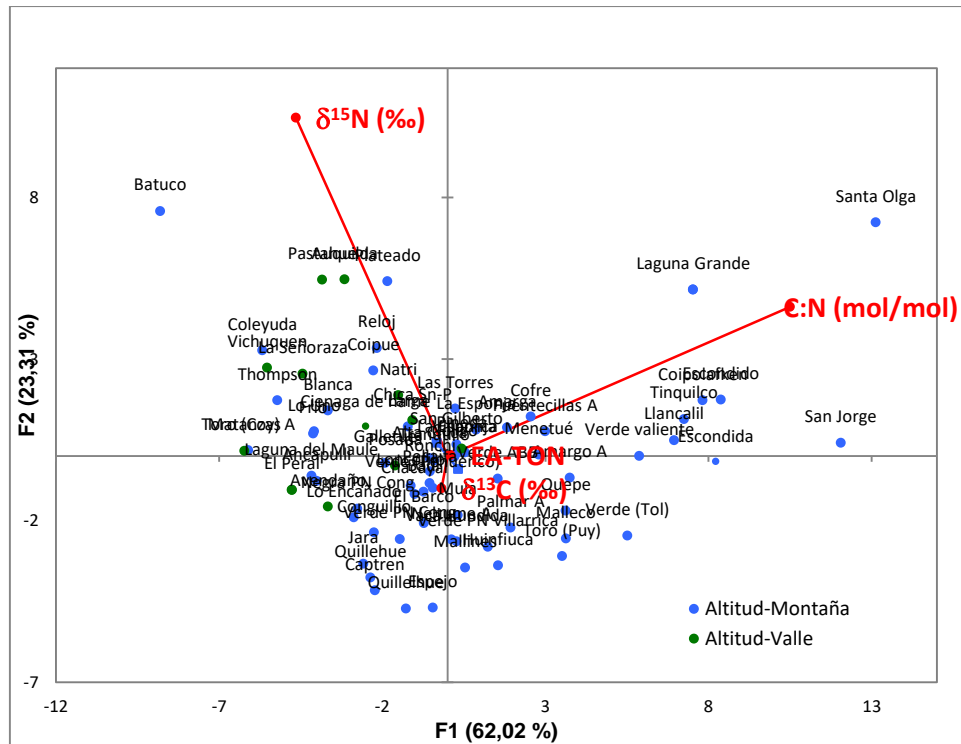


Figura 15. Análisis de Componentes Principales (ACP), para el total de lagos analizados (N=76) considerando los contenidos de materia orgánica en los sedimentos superficiales. Lagos de zonas bajas o valle (símbolo verde) y lagos de montaña (símbolo azul)

Luego, con el objeto de identificar agregaciones entre grupos de variables de respuesta (lagos en estudios), se procedió a agrupar los lagos en función de su ubicación en el eje altitudinal y los grupos de lagos categorizados por dicha componente, se representó gráficamente cada en función de los respectivos centroides (Figura 16). Sobre el particular, se hace presente que los resultados expresados en la Figura 16 corresponde al análisis efectuado sin el parámetro COT como fuera indicado precedentemente con el objeto de eliminar el efecto dominante del alto contenido de dicho parámetro en la asociación de grupos característicos de lagos, manteniendo entonces el ponderador de los ambos componentes principales (F1 y F2) sobre la matriz global de vectores propios resultantes del análisis de componente principales.

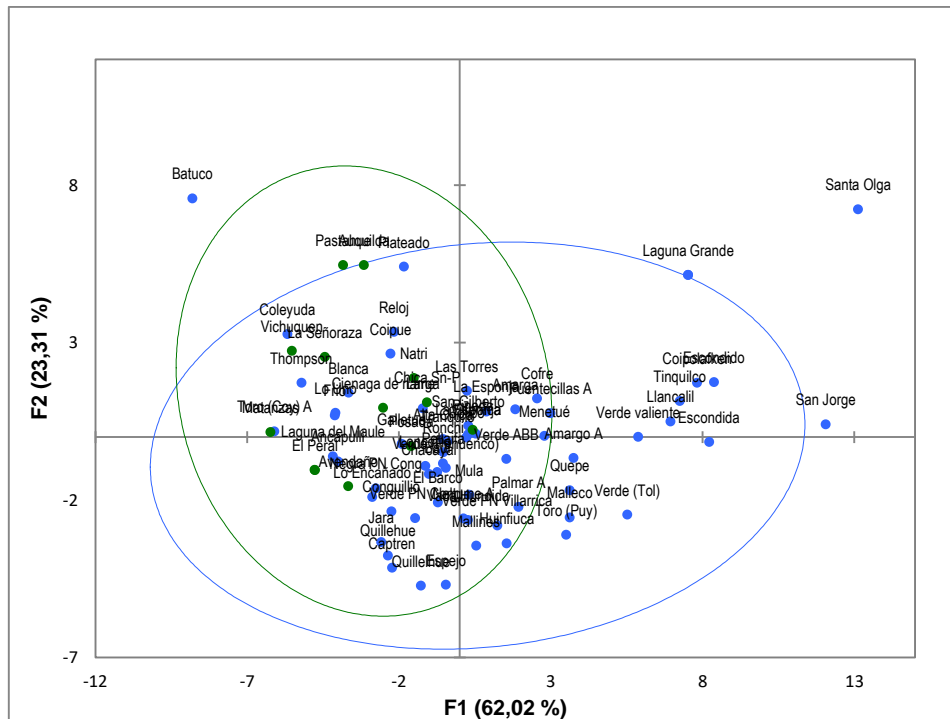


Figura 16. Análisis de Componentes Principales (ACP), para el total de lagos analizados (N=76) considerando los contenidos de materia orgánica en los sedimentos superficiales. Lagos de zonas bajas o valle (símbolo verde) y lagos de montaña (símbolo azul)

Sobre el particular, habiendo agrupado los datos por su ubicación geográfica en función de un gradiente altitudinal es posible evidenciar que aquella agregación de lagos montañosos presentan una amplia distribución en el plano del primer componente (F1), y que aun existiendo una marcada sobreposición, es posible indicar que aquellos lagos de altitudes bajas (definidos como de valle) se concentran en los planos cartesianos I y IV del primer componente, donde se registran las correlaciones negativas.

Respecto de aquellos cuerpos lacustres que presentan la mayor dispersión respecto de cada uno de los planos definidos por los componentes principales 1 y 2 (F1 y F2 respectivamente), es posible señalar que algunos de estos lagos presentaron un alto contenido de materia orgánica en sus sedimentos según se destaca en los valores reportados en la Tabla N°3, sin embargo no son necesariamente aquellos que

presentaron los mayores registros de COT y NOT en sus sedimentos, a excepción de los lagos Santa Olga (COT=44 %), Pastahue (COT=28,27%) y San Jorge (COT=17,62%). Luego, la segregación espacial entre dichos puntos queda definida por la composición geoquímica, descartando para tal efecto el contenido de Carbono Orgánico Total de la muestra con el objeto de corregir el efecto producido por aquellos altos valores de COT registrados en las muestras. En tal sentido aquellos lagos que presentaron mayor dispersión respecto a los demás lagos son: Batuco, Santa Olga, Laguna Grande, San Jorge, Pastahue, Plateado, Auquilda, Verde (Tolhuaca), Verde Valiente y Mallines.

Respecto de los lagos con patrones descritos en el párrafo precedente, es importante señalar que al relacionar el comportamiento en el análisis de componentes principales realizados y los valores de registro de los parámetros presentados en la Tabla 3, la condición de puntos distantes no obedece a un patrón general. A saber los distintos patrones característicos detectados en los lagos “outliers” son: Alto contenido de COT (lagos Santa Olga, Pastahue, Verde (Tol), Verde valiente y Mallines, con valores de COT de 44%; 28,27%; 21,5%; 18, 16% y 16,12% respectivamente), Alto registro de $\delta^{15}\text{N}$ (Batuco y Auquilda con valores de 17,76‰ y 6,51‰ respectivamente), Alto registro de la razón C:N (Laguna grande y San Jorge con valores de 23,58 mol/mol y 25,63 mol/mol respectivamente) y Bajo contenido de COT (Plateado con un registro de 2%).

Finalmente, las características limnológicas y ambientales de los lagos que presentaron particularidades o agrupaciones determinadas por similares en la composición geoquímica de los sedimentos, serán materia de discusión y análisis en el capítulo siguiente.

V. DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio, además de constituir uno de los primeros estudios en analizar un espectro tan amplio de sistemas lacustres a lo largo de la costa oeste de América del Sur, aportan importante información ambiental respecto a las características y composición geoquímica de los sedimentos superficiales lacustres que dan cuenta, entre otras, respecto de las condiciones ambientales de las cuencas lacustre que las constituyen, además de la condición del período comprendido correspondiente a los primeros 2 cm de la capa sedimentaria.

En particular, con las series de datos geoquímicos (materia orgánica COT, NOT, $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$), además de datos climatológicos, y de ubicación altitudinal y latitudinal de 76 lagos del cordón andino ubicados en la costa oeste de Sudamérica, se evaluó y analizó la existencia de potenciales gradientes ambientales, ya sean forzados por el emplazamiento y/o por variables climatológicas, e inferir algunas consideraciones de efectos antrópicos determinados por proximidad a centros urbanos o usos intensivos y extensivos de las cuencas lacustres que configuran las vertientes aportantes de los agentes geoquímicos que determinan la calidad de sus aguas o de sus matrices sedimentarias.

Asimismo, los hallazgos del presente estudio permitieron establecer, en primer término, el posible origen de la materia orgánica presente en los sedimentos lacustres superficiales, resultando que el mayor aporte del Carbono orgánico tiene su origen en plantas terrígenas del tipo C_3 y algas lacustres, permitiendo inferir además de las condiciones tróficas de los lagos, donde se reportan altos niveles de N, y consecuentemente una baja relación de las variable C:N. Sobre este aspecto, varios estudios postulan que la importancia relativa de la aloctonía en lagos se relaciona con factores tales como el color del lago, y la cantidad de material húmico presente, además del estado trófico y el tamaño de la cuenca. Por lo tanto, aloctonía tiende a ser más alta en pequeños lagos húmicos, y más bajo en los lagos eutróficos y/o los

lagos aguas claras con menos influencia terrestre respecto del aporte de materia orgánica (Jones, 1992; Cole *et al.*, 2011).

Los resultados obtenidos en el presente estudio respecto del origen de la materia orgánica depositada en los sedimentos, basado de los valores distintivos del $\delta^{13}\text{C}$, usado en conjunto con la razón C:N, para la identificación del origen del carbono desde plantas C_3 y C_4 que se presentan en la Figura 17, se ajustan a los reportes presentados por algunos autores (Meyers, 1994; Meyers, 2003; Wang & Woller, 2006) estos valores corresponden a una guía general del posible origen de la materia orgánica que configuran los sedimentos indicando además que las posibles variaciones detectadas respecto del patrón descrito representan las variaciones naturales en la composición biogeoquímica, modificaciones diagenéticas de la composición inicial o evidencias de posibles cambios paleoambientales, expresados en aportes extrínsecos al sistema lacustre (e.g. aportes terrígenos por escorrentía, relaves de laderas, transporte de material vegetal por acción eólica, entre otros)

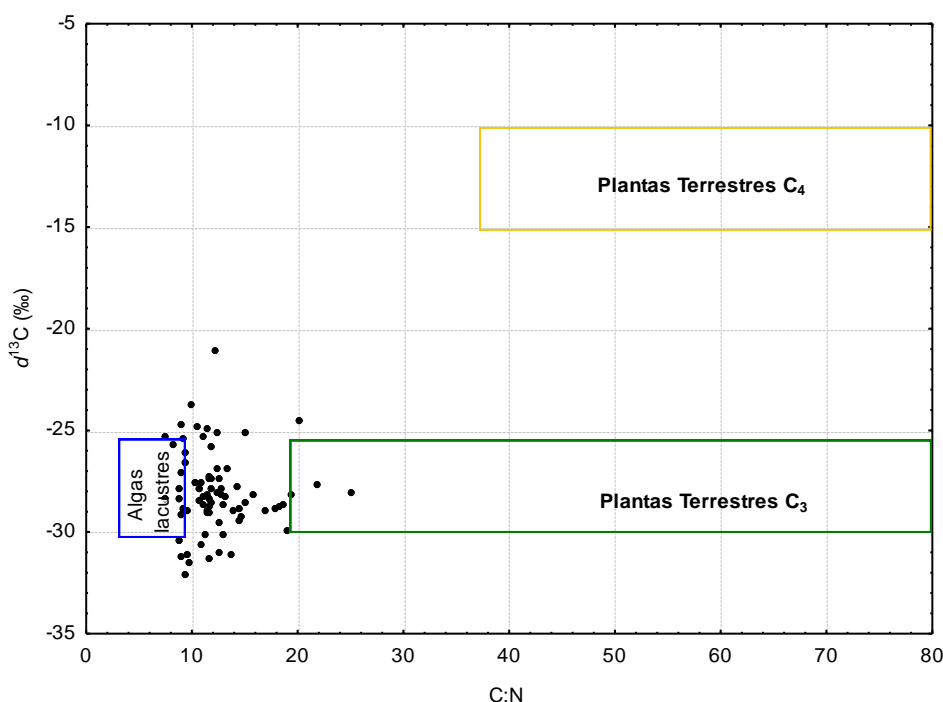


Figura 17. Valores generalizados de $\delta^{13}\text{C}$ and C:N de las principales fuentes de materia orgánica a los sedimentos proveniente de las plantas

Los resultados presentados en la Figura 17 permiten inferir, sobre la base de las relaciones descritas para el origen de la materia orgánica, y de los valores de la composición isotópica del C y de la relación C:N, que la totalidad de los lagos analizados en el presente estudio dan cuenta de sedimentos cuyo contenido de materia orgánica, principalmente en el aporte de Carbono orgánico, tiene un origen principalmente terrígeno y desde el material depositario proveniente de las algas lacustres que dan cuenta de la productividad de los lagos. Lo anterior, en consideración a que los valores de la razón C:N obtenidos en nuestros estudios presentaron rangos desde 8 a 25 y entre -20 y -32 para el caso de isotopo $\delta^{13}\text{C}$ (‰), condición que se ajusta a los reportes por distintos autores en estudios de sedimentos lacustres en distintas latitudes (Meyers, 1994; Meyers, 2003; Wang & Woller, 2006) y cuyo esquema resumido sobre los rangos reportados en distintos sistemas se presenta en la Figura 18.

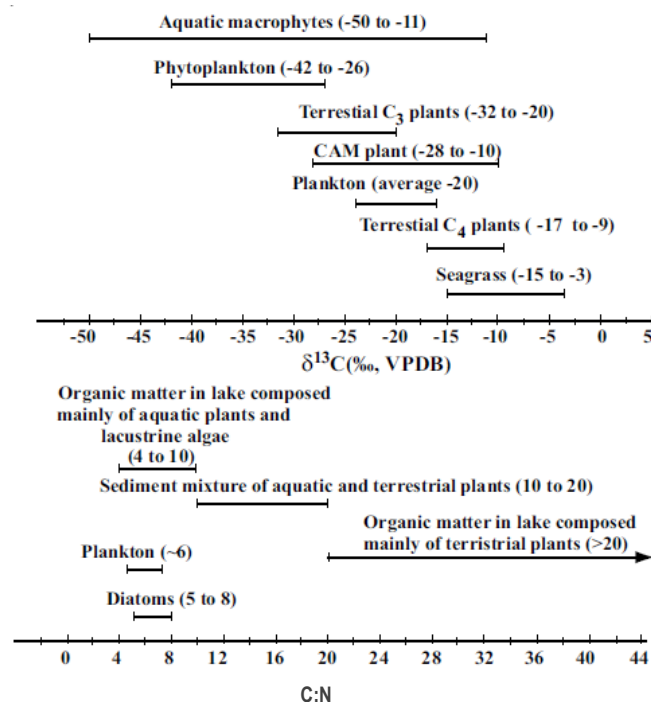


Figura 18. Variación del Carbono isotópico en ecosistemas (superior) y variación en el contenido C:N en el ecosistema (inferior). La línea terminada en punta de flecha indica que el rango es mayor a la escala presentada en el eje. (*Figura modificada de Wang & Wooller, 2006*)

Al respecto, nuestros resultados apoyan los hallazgos de estudios previos que muestran que la relación C:N de sedimentos es relativamente sensible a la perturbación de las cuencas lacustres (Sollins et al., 1984, Aller 1994; Meyers, 1994), y que las tendencias en esta proporción reflejan el tipo de perturbación que potencialmente puede afectar a las cuencas en función de los niveles de Carbono y Nitrógeno presentes en las matrices lacustres, sea por condición natural o por influencia antrópica. En general, las relaciones C:N en los lagos analizados fueron mayores que las proporciones típicas de fitoplancton, pero inferior a las proporciones para la vegetación terrestre, indicando que algunos materiales orgánicos alóctonos contribuyeron con el aporte de nutrientes a los lagos, condición que ha sido reportada en estudios de perturbaciones antropogénicas en cuencas lacustres canadienses (Das *et al*, 2008)

Respecto de los análisis espaciales de los parámetros geoquímicos y sus relaciones con las variables hidroclimáticas, los resultados permiten establecer patrones distribucionales en la composición geoquímica de los sedimentos lacustres, en gradientes determinados principalmente por los componentes hidroclimáticos precipitación y temperatura, con un marcado punto de inflexión a partir de los 40 grados de latitud Sur (40°S) condición que se asocia al núcleo y límite norte de extensión estacional de los vientos de la deriva del oeste (SWW).

Al respecto, varios estudios sobre climatología y cambio climáticos, plantean que eventos climáticos como los que caracterizan los westerlies, pueden llegar a configurar un cambio en la composición geoquímica (Adrián *et al*, 2009), origen de la materia orgánica, su composición isotópica, y las características orográficas de las cuencas, condición que ha sido ampliamente señalado en estudios climáticos previos, los que establecen que en la cuenca oriental de Suramérica, dominada por los vientos westerlies, se produce un fuerte forzante climático a las condiciones ambientales asociadas al cambio climático y al régimen de anomalías climáticas en dichas latitudes debido a la influencia de la circulación oceánica (Rojas *et al*, 2009). La representación

esquemática del comportamiento de los vientos de la deriva del oeste en la zona centro sur de las costas frente a Chile se comporta según lo muestra la Figura 19.

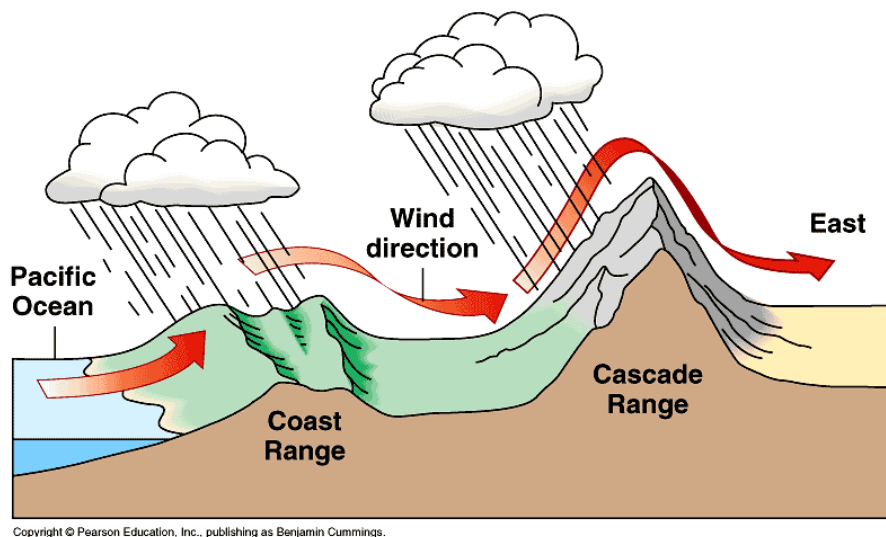


Figura 19. Esquema representativo del comportamiento de los vientos oceánicos sobre el cordón montañoso de Suramérica

El viento del sur oeste (SWW) y las tormentas asociadas, son la principal fuente de humedad para el continente sudamericano, con la mayor precipitación ($> 7000 \text{ mm año}^{-1}$) en el núcleo del SWW ($\sim 50^\circ \text{ S}$). Asimismo, la abundante precipitación de origen occidental sostiene el bosque lluvioso templado con una segregación climática de la vegetación que ha llevado al reconocimiento de comunidades boscosas marcadas a lo largo de un gradiente latitudinal con el aumento de las precipitaciones y velocidades del viento, temperaturas más bajas y duración de la temporada de crecimiento, característico de la pluviselva Valdiviana (Veblen & Schegel, 1982; Fletcher & Moreno, 2012). Además, los Andes orientados al N-S establecen un efecto de sombra de lluvia que caracteriza la vegetación del lado este con una estepa patagónica más subhúmeda a semiárida a medida que disminuye la humedad. Esta interceptación orográfica del SWW entrega $> 1000 \text{ mm año}^{-1}$ de lluvia al lado del Pacífico y $< 100 \text{ mm año}^{-1}$ al lado patagónico con la mayor cantidad de lluvia observada en el área de influencia perenne del SWW (Al sur de 40° S) en el lado pacífico de los Andes (Lamy *et al*, 2010; Kilian & Lamy, 2012; Garreaud, 2009, Rojas *et al*, 2009), según se muestra en la Figura 20.

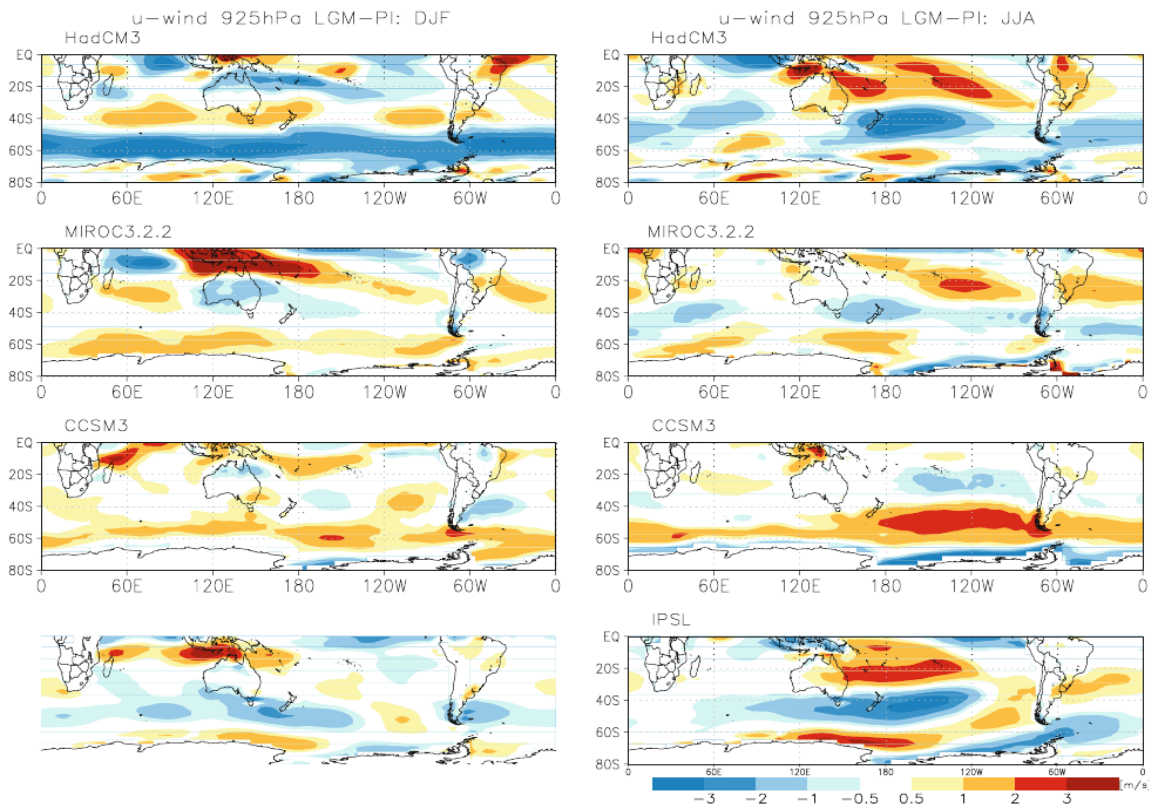


Figura 20. Registros de los vientos de la deriva del oeste (westerlies) a condición de 925 hPa para el verano (columna de la izquierda) e invierno (columna de la derecha) según modelaciones obtenidas por Rojas *et al* 2009 (para la última glaciación máxima)

En la búsqueda de identificar patrones geográficos en los clúster de sistemas lacustres, es importante señalar que no fue posible identificar patrones claros y distintivos de asociaciones lacustres con particularidades geoquímicas específicas y que obedecieran a un patrón físico o químicos de la composición geoquímica de los sedimentos. Sin embargo, los primeros resultados permitieron identificar un conjunto de lagos que sin representar una homogeneidad entre ellos, si presentaron claros patrones de dispersión respecto del conjunto de lagos analizados. Este grupo de lagos, llamados puntos “outliers” presentaron particularidades en la composición geoquímica de sus sedimentos, dentro de los cuales destacan aquellos que presentaron altos contenidos de COT (%) tales como Santa Olga, Vaca Hundida, Pastahue, El Peral, Verde (Tolhuaca) y Natri, y que presentaron amplia distribución latitudinal en su emplazamiento. Entre estos lagos, destacan Santa Olga y Vaca Hundida, con los valores más altos de COT (44,74 y 34,28% respectivamente) que junto con los Lagos

Verde (Tol) y Verde Valiente, son característicos de lagos de la zona cordillerana del centro sur de Chile, con bajo niveles de intervención antrópica y cubiertos por zonas densamente pobladas con vegetación en sus cuencas, incluso con zonas de inundación de considerable extensión de bosques nativos en el caso de la laguna Vaca hundida. Por otro lado destacan los lagos Natri y Pastahue que son lagos emplazados en la Isla grande de Chiloé y que en sus cuencas de agua se desarrolla importantes actividades acuícolas asociadas a la salmonicultura.

Luego de efectuado el reanálisis descartando el efecto de los altos contenidos de COT en los sedimentos, los resultados permitieron identificar leves diferencias entre lagos costeros o situados bajos los 200 msnm y el otro grupo dominado por lagos montañosos o precordilleranos. Dentro de este segundo grupo se evidencia un grupo de lagos dominados por lagos presentes en las latitudes 42 y 46°S además de la Laguna Santa Olga. La ubicación y características generales de los lagos que conforman esta asociación parece indicar la característica de lagos dominados por cuencas con sedimentos ricos en materia orgánica de origen terrestre y con intervención antrópica moderada, ubicadas en la cuencas medias de los cordones montañosos y con baja presencia de intervención o uso antropogénico respecto a cuencas aportantes, con presencia de áreas vegetacionales dominadas por especies arbóreas nativas con abundante cubierta vegetal.

Respecto de los lagos que se separan por la primera componente y que fueron clasificados como lagos costeros o de zonas bajas, es posible inferir que dicha asociación está definida por ser lagos con potenciales mayores aportes antropogénicos por el emplazamiento de las respectivas cuencas y que corresponden a sistemas lacustres emplazados en zonas de uso intensivo de sus cuencas por cercanía o ser de uso de centros urbanos, a saber. Lagos: El Peral, Matanza, Vichuquén, Ciénaga de name, Avendaño, Pineda, Chica de San Pedro, La Posada, La Señoraza, Pastahue, Auquilda, Coipue y Natri, siendo los cuatro último lagos situados en la Península de Chiloé, donde el Lago Natri está sometido a una intensa actividad

acuícola de salmicultura, dando cuenta además de las variaciones en los contenidos de materia orgánica y especialmente NOT.

Respecto de lagos con particularidades geoquímicas en sus sedimentos en el análisis sin el efecto de los altos contenidos de COT, también fue posible identificar lagos con características propias, que se presentan con las más altas variaciones respecto de la primera componente principal que son el Lago Batuco y Laguna Grande (que son lagos de la zona norte de Chile) con bajo contenido de materia orgánica que junto con el lago San Jorge (zona Sur) presentaron altos registros de la razón C:N y en el caso de Batuco, el más alto contenido del isótopo de Nitrógeno (15‰)

Finalmente, los resultados no permiten establecer patrones claros en latitud o altitud relacionados con la ubicación geográfica de su emplazamiento, respecto a las características geoquímicas de los sedimentos superficiales. Sin embargo, es posible establecer condiciones particulares de notables diferencias en ciertos lagos respecto de la composición, especialmente de materia orgánica de los sedimentos y que permiten dar cuenta de la actividad que se asocia a ellos y/o de las condiciones geográfica u orográficas de sus cuencas, y establecer diferencias entre los lagos emplazados más hacia las zonas bajas que aquellos emplazados en cordones cordilleranos.

Así también, resultó notable los hallazgos respecto de las variaciones y los comportamientos de la composición geoquímica de los sedimentos respecto de las características climatológicas consideradas en el estudio, especialmente asociadas a la temperatura y las precipitaciones con patrones entre las variables geoquímicas y la climatología, con un notable punto de inflexión alrededor de los 40°S, donde a partir de tal latitud se produce un cambio en el patrón de correlación entre variables geoquímicas y la climatología, dando cuenta de los reportes sobre los vientos de la deriva del oeste en dicha zona.

VI. CONCLUSIONES – RECOMENDACIONES

A la luz de los resultados obtenidos, sobre la base de los análisis efectuados en el presente estudio, es posible señalar que respecto de la composición geoquímica e isotópica de los sedimentos lacustres de los lagos estudiados, existen patrones de correlaciones generales entre las variables que definen o configuran el emplazamiento de los distintos sistemas lacustres, y las propiedades geoquímicas de dichos sedimentos, dando cuenta de condiciones ambientales propias y características que configuran las cuencas lacustres especialmente de aquellos que presentaron mayores “anomalías” en los contenidos de los parámetros analizados, especialmente de aquellos con alto o muy bajo contenido de Carbono orgánico total y aquellos con registros particularmente altos de C:N, que da cuenta de las variaciones de las proporciones del contenido de Nitrógeno en las muestras.

Sobre el particular, las relaciones detectadas permiten inferir, que los sistemas obedecen a patrones distribucionales y a factores físicos que configuran su ambiente físico-químico, sino que además existen factores biogeoquímicos que deben ser indagados con mayor detalle, principalmente, configuraciones locales y antropogénicas de las cuencas aportantes y relaciones climatológicas como elementos forzantes del aporte alóctonos de materia orgánica que finalmente se deposita en los sedimentos

Asimismo, el comportamiento global de la información, indican tendencias que requieren mayor atención y que deberán ser objetos de exploraciones de nuevas técnicas multivariadas y/o agrupamiento de datos considerando particularidades físicas (estudios por macrozonas) por condiciones climatológicas y/o por localización específica de los cuerpos lacustres.

Los resultados obtenidos en relación al origen de la materia orgánica presente en los sedimentos, revelan información consistente sobre que el origen del C presente en la materia orgánica tiene su origen en una mezcla de aporte terrígeno y de material algal

presente en los respectivos cuerpos de aguas, resultados que se ajustan a los patrones descriptivos publicados en estudios previos, según se reporta en Figura 18, constituyendo dicha información como base para una aproximación paleoambiental que permita indagar sobre una reconstrucción paleoclimática basados en registros de fuentes de Carbono o proxies relacionados con material vegetal, tales como polen, cera de hojas, entre otros.

Respecto de las principales fuentes de variación espacial del contenido de C, N e isótopos estables, los resultados obtenidos permiten tener una aproximación espacial de dichas variaciones especialmente en las tendencias generales reportadas a lo largo del gradiente latitudinal respecto del contenido geoquímico de los sedimentos. A saber, los contenidos de COT, NOT, y sus isótopos estables de los lagos emplazados en el gradiente latitudinal del área estudiada, presentaron variaciones latitudinales lo que permitió establecer un comportamiento zonal (Norte y Sur) respecto de la caracterización de sus sedimentos (Figuras 8 y 9). Al respecto, dicho gradiente responde claramente, y los análisis de tendencias así lo muestran, a las variaciones climatológicas analizadas, especialmente respecto de las variables temperatura y precipitaciones, las cuales junto con establecer un gradiente climático, establece un importante punto de inflexión en el área establecida alrededor de los 40°S.

Asimismo, la identificación de agregaciones o grupos de lagos que comparten atributos particulares en la composición geoquímica de los sedimentos, permitió establecer e identificar un conjunto de sistemas lacustres que se presentan como unidades que se alejan del patrón general, según los resultados de los análisis de componentes principales, identificados como “outliers” y que de acuerdo a su área de emplazamiento responde a cuencas que presentan particularidades respecto de los patrones generales. A saber, dentro de este grupo de lagos, se encuentran en general los lagos Santa Olga y Vaca Hundida, que presentaron altos contenidos de materia orgánica, y aquellos lagos emplazados en la península de Chiloé, donde se desarrolla una intensa actividad acuícola en sus cuerpos de agua. Lo anterior, junto con el patrón mostrado por aquellos lagos emplazados a altitudes bajas (clasificados como lagos de Valles)

dan cuenta de un potencial efecto antropogénico sobre las cuencas de aquellos lagos de mayor intervención antrópica, situación que se ve refrendado con los resultados expresados en la Figura 16, donde el ACP muestra una tendencia a agrupar los lagos de “Valle” en un rango más acotado respecto a la primera componente (F1) que aquellos lagos de montaña, lo cual daría cuenta de lagos con sedimentos de características particulares, presumiblemente por sus proximidades con centros urbanos o estar emplazados en cuencas con mayor uso e intervención del territorio.

Finalmente, los resultados obtenidos en el presente estudio reveló importante evidencia respecto a variaciones en la composición geoquímica de los sedimentos lacustres superficiales y marcada presencia de patrones climatológicos en el gradiente latitudinal, lo cual permite hacer además referencias respecto a potenciales presiones antropogénicas sobre sus cuencas que se traducen en variaciones en los contenidos de materia orgánicas y sus compuestos isotópicos, por lo cual resulta importante la realización de estudios que permitan indagar elementos o parámetros específicos que den cuenta de perturbaciones propias de la actividad antropogénica que permitan esclarecer e identificar con mayor certeza, posibles fuentes de aporte alóctono de agentes trazadores geoquímicos en las matrices sedimentarias de los sistemas lacustres.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adrian, R., C. O'Reilly, H. Zagarese, S. Baines, D. Hessen, W. Keller, D. Livingstone, R. Sommaruga, D. Straile, E. Van Donk, G. Weyhenmeyer & M. Winder. 2009 Lakes as sentinels of climate change. *Limnol. Oceanogr.*, 54(6, part 2), pp. 2283–2297.
- Arcagni, M., A. Rizzo, L. Campbell, M. Arribére, R. Juncos, M. Reissig, K. Kyser, J. Barriga, M. Battini & S. Ribeiro. 2015. Stable isotope analysis of trophic structure, energy flow and spatial variability in a large ultraoligotrophic lake in Northwest Patagonia. *Journal of Great Lakes Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jglr.2015.05.008>
- Boyle, J.F. 2002. Inorganic geochemical methods in paleolimnology. En: W. Last y J. Smol (Eds): *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 2: Physical and Geochemical Methods*. Kluwer Academic Publishers, New York, pp.83-142.
- Brodie, C., J. Casford, J. Lloyd, M. Leng, T. Heaton, C. Kendrick & Z. Yongqiang. 2011. Evidence for bias in C:N, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of bulk organic matter, and on environmental interpretation, from a lake sedimentary sequence by pre-analysis acid treatment methods. *Quaternary Science Review* (2011): pp.1-12
- Brönmark, C. & L. Hansson. 2002. Environmental issues in lakes and ponds: current state and perspectives. *Environmental Conservation* 29 (3): 290–306 pp.
- Castañeda, I. & S. Schouten. 2011. A review of molecular organic proxies for examining modern and ancient lacustrine environments. *Quaternary Science Reviews* (30): 2851-2891 pp.
- Cisternas, M., L. Torres, R. Urrutia, A. Araneda & O. Parra. 2000. Comparación ambiental, mediante registros sedimentarios, entre las condiciones prehispánicas y actuales de un sistema lacustre. *Rev. Chilena de Historia Natural*. 73: pp. 151-162.

- Cohen, A.S. 2003. *Paleolimnology: The history and evolution of lake systems*. Oxford University Press, New York. 528 pp.
- Cole, J., S. Carpenter, M. Pace, M. Van de Bogert, J. Kitchell & J. Hodgson. 2006. Differential support of lake food webs by three types of terrestrial organic carbon, *Ecol. Lett.*, 9, 558–568 pp.
- Cole, J. , S. Carpenter, J. Kitchell, M. Pace, C. Solomon & B. Weidel, B. 2011. Strong evidence for terrestrial support of zooplankton in small lakes based on stable isotopes of carbon, nitrogen, and hydrogen, *PNAS*, 108, 1975–1980.
- Cottingham, K., J. Rusak & P. Leavitt. 2000. Increased ecosystem variability and reduced predictivity following fertilization: evidence from paleolimnology. *Ecol Lett* (3):340–348 pp.
- Das, Biplob, A. Narwani, B. Matthewa, R. Nordin & A. Mazumber, 2008. Anthropogenic disturbance history influences the temporal coherence of paleoproductivity in two lakes. *J. of Paleolimnology* (2): 167-181 pp.
- Del Puerto, L. F. García-Rodríguez, R. Braco, C. Castiñeira, A. Blasi, H. Inda, N. Mazzeo & A. Rodríguez. 2011. Evolución Climática Holocénica para el Sudeste del Uruguay. Análisis Multi-Proxy en Testigo de Lagunas Costeras. En: F. García-Rodríguez (Ed.). *El Holoceno en la zona costera de Uruguay*. Depto. De Publicaciones, Universidad de la República. Pp. 117-147.
- Díaz, M., F. Pedrozo, C. Reynolds & P. Temporetti. 2007. Chemical composition and the nitrogen-regulated trophic state of Patagonian lakes. *Limnologica* (37): pp. 17-27
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J.M., Lara, A., Newton, A., 2006. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biol. Conserv.* 130, 481–494 pp.
- Evans, R. D. 2001. Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition. *Trends in Plant Science* 6, 121–126 pp..

- Faganeli, J., A. Malej, J. Pedzic & V. Malacic. 1988. C:N:P ratios and stable C isotopic ratios as indicators of sources of organic matter in the Gulf of Trieste (North Adriatic). *Oceanologica*. 11(4): 377-382 pp.
- Fawcett, P.J., Werne, J.P., Anderson, R.S., Heikoop, J.M., Brown, E.T., Berke, M.A., Smith, S.J., Goff, F., Donohoo-Hurley, L., Cisneros-Dozal, L.M., Schouten, S., Sinninghe Damste, J.S., Huang, Y., Toney, J., Fessenden, J., WoldeGabriel, G., Atudorei, V., Geissman, J.W., Allen, C.D., 2011. Extended megadroughts in the southwestern United States during Pleistocene interglacials. *Nature* 470, pp. 518–521.
- Fletcher, M. & P. Moreno. 2012. Vegetation, climate and fire regime changes in the Andean region of southern Chile (38°S) covaried with centennial-scale climate anomalies in the tropical Pacific over the last 1500 years. *Quaternary Science Reviews*. 46(2012):46-56 pp.
- Garreaud, R. & M. Falvey. 2009. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *International Journal of Climatology*. 29(4): 543-554 pp.
- Hairston, N & G. Fussman. 2002 Lakes Ecosystems. *Encyclopedia of Life Sciences*. MacMillan Publishers Ltd, Nature Publishing Group. pp. 1-3.
- Herczeg, A. L., A. K. Smith and J. C. Dighton 2001. A 120 year record of changes in nitrogen and carbon cycling in Lake Alexandrina, South Australia: C:N, delta N-15 and delta C-13 in sediments. *Applied Geochemistry* 16, pp. 73–84.
- Higginson, M. 2009. Geochemical Proxies (Non-Isotopic). En: V. Gornitz (Ed), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Springer. 341-353 pp.
- Jacoby, W., 2000. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Electoral Studies*. 19:577-613 pp.
- Jones, R. I. 1992. The influence of humic substances on lacustrine planktonic food chains, *Hydrobiologia*, 229, 73–91 pp.
- Jones, R. I., L. King, M. M. Dent, S. C. Maberly and C. E. Gibson 2004. Nitrogen stable isotope ratios in surface sediments, epilithon and macrophytes from

- upland lakes with differing nutrient status. *Freshwater Biology* 49, 382–391 pp.
- Kadleca, J., G. Kocurekb, D. Mohrigb, D. Shindec, M. Muraric, V. Varmac, F. Stehlíkd, V. Benešf & A. Singhvic. 2015. Response of fluvial, aeolian, and lacustrine systems to late Pleistocene to Holocene climate change, Lower Moravian Basin, Czech Republic. *Geomorphology* (232): pp.193-208.
- Karlsson, J. and C. Sawstrom, C. 2009. Benthic algae support zooplankton growth during winter in a clear-water lake, *Oikos*, 118, 539–544 pp.
- Kilian, R. & F. Lamy. 2012. A review of Glacial and Holocene paleoclimate records from southernmost Patagonia (49-55°S). *Quaternary Science Reviews*. 53: 1-23 pp.
- Lamy, F., R. kilian, H. Arz, J-P. Francois, J. Kaiser, M. Prange & T. Steinke. 2010. Sedimentological and pollen records from the fjord region of southern Chile. doi:10.1594/PANGAEA.760035, Supplement to: Lamy, F et al. (2010): Holocene changes in the position and intensity of the southern westerly wind belt. *Nature Geoscience*, 3(10), 695-699, doi: 10.1038/ngeo959.
- Last, W.M. 2002a. Textural analysis of lake sediments. En: W. Last y J. Smol (Eds): *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 2: Physical and Geochemical Methods*. Kluwer Academic Publishers, New York, pp 41-82.
- Last, W.M. 2002b. Mineralogical analysis of lake sediments. En: W. Last y J. Smol (Eds): *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 2: Physical and Geochemical Methods*. Kluwer Academic Publishers, New York, pp 143-188.
- Lovenduski, N, N. Gruber, S. Doney, & I Lima. 2007. Enhanced CO₂ outgassing in the Southern Ocean from a positive phase of the Southern Annular Mode. *Global Biogeochemical Cycles*. 21(2): 234-249 pp.
- Le Quéré,C., C.Rödenbeck, E. Buitenhuis, T. Conway, R. Lagenfelds, A. Gómez, C. Labuschagne, M. Ramonet, T. Nakazawa, N. Metzli, N. Guillet & M.

- Heiman. 2007. Saturation of the southern ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science*. 316(5832): pp. 1735-1738.
- León-Muñoz, J., Echeverría, C., Marcé, R., Riss, W., Sherman, B., Iriarte, J.L., 2013. The combined impact of land use change and aquaculture on sediment and water quality in oligotrophic lake Rupanco (north Patagonia, Chile, 40.8°S). *J. Environ. Manag.* 128, pp.283–291.
- Markgraf, V. 1991. Late Pleistocene environmental and climatic evolution in southern America. *Bamberger Geographische Schriften*, 11, pp. 271-282.
- Markgraf, V., Dodson, J.R., Kershaw, A.P., McGlone, M.S. & N. Nicholls. 1992. Evolution of late Pleistocene and Holocene climates in the circum-South Pacific land areas. *Climates Dynamics*, 6, pp. 191-211.
- Markgraf, V. 1993. Paleoenvironments and paleoclimates in Tierra del Fuego and southernmost Patagonia, South America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 102 (1993), pp. 53-68.
- Markgraf, V., Baumgartner, T.R., Bradbury, J.P., Diaz, H.F., 2000. Paleoclimate reconstruction along the Pole-Equator-Pole transect of the Americas (PEP 1). *Quaternary Science Reviews* 19 (1-5), 125-140.
- Markgraf, V., Bradbury, J.P., Schwalb, A., Burns, S.J., Stern, C., Ariztegui, D., Gilli, A., Anselmetti, F.S., Stine, S., Maidana, N., 2003. Holocene palaeoclimates of southern Patagonia: limnological and environmental history of Lago Cardiel, Argentina. *The Holocene* 11, pp. 581–591.
- McGlone, M., J. Wilmshurst & S. Wiser. 2000. Late glacial and Holocene vegetation and climatic change on Auckland Island, Subantarctic New Zealand. *The Holocene*, 10, 6 (2000), pp. 719-728.
- Meyers, P.A., 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter during and after deposition. *Chem. Geol.* 144, pp. 289–302.
- Meyers, P.A., 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnology and paleoclimatic process. *Org. Geochem.* Vol. 27(5/6), pp. 213-250.

- Meyers, P. A., 2003. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry* 34, pp. 261–289.
- Meyers, P.A., 2006. An overview of sediment organic matter records of human eutrophication in the Laurentian Great Lakes region. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 6: pp. 453-463.
- Meyers, P.A. & R. Ishiwatari, 1993. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org. Geochem.* 20, pp. 867–900.
- Moreno, P.I., Jacobson, G.L., Lowell, T.V., Denton, G.H., 2001. Interhemispheric climate links revealed by a late-glacial cooling episode in southern Chile. *Nature* 409, pp. 804-808.
- Moreno, P.I., Francois, J.P., Moy, C.M., Villa-Martinez, R., 2010. Covariability of the Southern Westerlies and atmospheric CO₂ during the Holocene. *Geology* 38 (8), pp. 727-730.
- Moreno, P.I., Villa-Martinez, R., Cardenas, M.L., Sagredo, E.A., 2012. Deglacial changes of the southern margin of the southern westerly winds revealed by terrestrial records from SW Patagonia (52 °S). *Quat. Sci. Rev.* 41, pp. 1-21.
- Moy, C.M., Dunbar, R.B., Moreno, P.I., Francois, J.P., Villa-Martinez, R., Mucciarone, D.M., Guilderson, T.P., Garreaud, R.D., 2008. Isotopic evidence for hydrologic change related to the westerlies in SW Patagonia, Chile, during the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 27 (13-14), pp. 1335-1349.
- Nakamura, H. & A. A. Shimpo. 2004. Seasonal Variations in the Southern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams as Revealed in a Reanalysis Dataset. *Journal of Climate* (17): 1828-1844.
- Olfield, F. & K. Anderson. 2003. The Societal Relevance of Paleoenvironmental Research. En: K. Alverson, A. Thomas, F. Pedersen & R. Bradley (Eds). *Paleoclimate, Global Change and the Future. Global Change – The IGBP Series.* Pp.1-11

- O'Beirne, M., L. Strzok, J. Werne, T. Johnson & R. Hecky. 2015. Anthropogenic influences on the sedimentary geochemical record in western Lake Superior (1800–present). *Journal of Great Lakes Research*. 41 (2015): 20-29 pp.
- Oliva, M.; Gómez Ortiz, A. y Schulte, L. (2010). Tendencia a la aridez en Sierra Nevada desde el Holoceno Medio inferida a partir de sedimentos lacustres. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* (52) 27-42 pp.
- Patoine A, Leavitt PR (2006) Century-long synchrony of fossil algae in a chain of Canadian prairie lakes. *Ecology* (87):1710–1721 pp.
- Peterson, B. J. and B. Fry 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics* 18, 293–320 pp.
- Pizarro, J., Vergara, P.M., Rodríguez, J.A., Sanhueza, P.A., Castro, S.A., 2010. Nutrients dynamics in the main river basins of the Centre-southern region of Chile. *J. Hazard. Mater.* 175, 608–613.
- Pizarro, J., Vergara, P.M., Morales, J.L., Rodríguez, J., Vila, I., 2014. Influence of land use and climate on the load of suspended solids in catchments of Andean rivers. *Environ. Monit. Assess.* 186, 835–843.
- Pizarro, J., P. Vergara, S. Cerda & D. Briones. 2016. Cooling and eutrophication of southern Chilean lakes. *Science of the Total Environment* 541 (2016) 683–691 pp.
- Quiroz, J. 2012. Variabilidad climática de los últimos 80 KA CAL AP en el norte de México con *proxies* geoquímicos en sedimentos lacustres. Tesis Doctoral Universidad Autónoma de México. 122 pp.
- Rojas, M., P. Moreno, M. Kageyama, M. Crucifix, C. Hewitt, A. Abe-Ouchi, R. Phgaito, E. Brady & P. Hope. 2009. The southern Westerlies during the last glacial maximum in PMIP2 simulations. *Climate Dynamics* 32(4): pp.525-548.
- Routh, J., P. Meyers, T. Hjorth, M. Baskaran & R. Hallberg. 2007. Sedimentary geochemical record of recent environmental changes around Lake Middle Marviken, Sweden. *J Paleolimnol* (37):529–545 pp.

- Saha, S., S. Moorthi, H. Pan, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, R. Kistler, J. Woollen, D. Behringer, H. Liu, D. Stokes, R. Grumbine, G. Gayno, J. Wang, Y. Hou, H. Chuang, H. Juang, J. Sela, M. Iredell, R. Treadon, D. Kleist, P. Van Delst, D. Keyser, J. Derber, M. Ek, J. Meng, H. Wei, R. Yang, S. Lord, H. Van Den Dool, A. Kumar, W. Wang, C. Long, M. Chelliah, Y. Xue, B. Huang, J. Schemm, W. Ebisuzaki, R. Lin, P. Xie, M. Chen, S. Zhou, W. Higgins, C. Zou, Q. Liu, Y. Chen, Y. Han, L. Cucurull, R. Reynolds, G. Rutledge & M. Goldberg. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91.8 (Aug 2010): pp.1015-1057.
- Schindler, D.W., 2006. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnol. Oceanogr.* 51 (1, part 2), 356–363 pp.
- Smol, J.P. 2008. *Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective – 2nd Edition*. Blackwell Publishing, Oxford. 383 pp.
- Soto, D., 2002. Oligotrophic patterns in southern Chilean lakes: the relevance of nutrients and mixing depth. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 75, 377–393.
- Soto, D. & H. Campos, 1995. Los Lagos oligotrofos asociados al Bosque templado húmedo del sur de Chile. In: Armesto, J., Khalin, M., Yillagrán, C. (Eds.), *ecología de los bosques templados de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, pp. 134–148.
- Soto, D. & J. Stockner, 1996. Oligotrophic lakes in southern Chile and in British Columbia: basis for their resilience to present and future disturbances. In: Lawford, R., Alaback, P., Fuentes, E. (Eds.), *high latitude rain forest of the West coast of the Americas: climate, hydrology, ecology and conservation*. Springer-Verlag, New York, pp. 266–280
- Stefen, W., A. Person, L. Deutsch, J. Zalasiewicz, M. Williams, K. Richardson, C. Crumley, P. Crutzen, C. Folke, L. Gordon, M. Molina, V. Ramanathan, J. Rockström, M. Scheffer, H. Schellnhuber & U. Svedin. 2011. *The Anthropocene: From Global Change to Planetary Stewardship*. *Ambio*. Published online: 12 October 2011.
- www.kva.se/en

- Taylor, Zachary P. 2011. "Spatial Variation in Organic Carbon and Stable Isotope Composition of Lake Sediments at Laguna Zoncho, Costa Rica." PhD diss., University of Tennessee.
http://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/1032
- Tenorio, A. 2011. Paleoceanografía holocénica de la cuenca Farallón (Golfo de California): Integración de datos geoquímicos y biológicos. Tesis de grado de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México, 72 pp.
- Thompson, L. 2010. Climate change: The evidence and our options. *The behavior Analyst*. 33: pp. 153-179.
- Toggweiler, J.R., Russell, J.L., Carson, S.R. 2006. Midlatitude westerlies, atmospheric CO₂, and climate change during the ice ages. *Paleoceanography*, 21 (2), art. no. PA2005: pp. 1-15.
- Torres, I., P. Inglett, M. Brenner, W. Kenney & K. Ramesh Reddy. 2012. Stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) values of sediment organic matter in subtropical lakes of different trophic status. *Journal of Paleolimnology*. 47: pp. 693-706
- Vegen, T & F. Schlegel. 1982. Reseña ecológica de los bosques del sur de Chile. *Bosque* (4) 2: pp. 73-115.
- Ventura, M., 2009. Los lagos de alta montaña como sensores del cambio climático. In: Agua y cambio climático. Diagnóstico de los impactos previstos en Cataluña. Agencia Catalana d'Aigua II. Cap (16), pp. 215-220.
- Vila, I. 2003. Los Sistemas acuáticos continentales. Su ontogenia natural acelerada por efecto antrópico: La eutrofización y la salinización. En: Fernández, A & M. Salgot (Eds), 2003. El agua en Iberoamérica, Tópicos Básicos y Estudios de Caso. CYTED_XVII Programa Iberoamericano de Ciencias y Tecnología para el Desarrollo. pp. 11-21.
- Villa-Martínez, R., & P. Moreno. 2007. Pollen evidence for variations in the southern margin of the westerly winds in SW Patagonia over the last 12,600 years. *Quaternary Research* 68 (2007) pp. 400–409
- Wang, Y & M. Woller. 2006. The stable isotopic (C and N) composition of modern plants and lichens from northern Iceland: with ecological and paleoenvironmental implications. *Jökull* (56): pp. 27-37

- Wefer, G., W. Berger, J. Bijma & G. Fisher. 1999. Clues to Ocean History: a Brief Overview of Proxies. En: Fisher, G & G. Wefer (Eds), 1999. Use of Proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 1-68.
- Wetzel, R. G. 1983. Limnology, Saunders College Publishing, 767 pp.
- Ziga, P.K., E. C. Minor, J. P. Werne & S. McCallister. 2012. An isotopic ($\delta^{14}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$) investigation of the composition of particulate organic matter and zooplankton food sources in Lake Superior and across a size-gradient of aquatic systems. Biogeosciences, 9, Pp. 3663-3678
- Zolitschka, B. & D. Enters. 2009. Lacustrine Sediments. En: V. Gornitz (Eds), Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments. Springer. Pp. 485-488.