

UCH-FC
MAG-EBE
V 152
C.1

**CAMBIOS VEGETACIONALES Y CLIMÁTICOS
EN LA REGIÓN DE LOS LAGOS DURANTE LOS
ÚLTIMOS 3000 AÑOS Y SU ASOCIACIÓN CON
REGÍMENES DE FUEGO**



Tesis
Entregada a La
Universidad De Chile
En Cumplimiento Parcial De Los Requisitos
Para Optar Al Grado De

Magíster en Ciencias Biológicas con mención en
Ecología y Biología Evolutiva

Facultad De Ciencias

Por

MARCELA ALEJANDRA VALENZUELA SAAVEDRA

Enero, 2010

Director de Tesis
Dr. Patricio Iván Moreno Moncada

FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE CHILE

INFORME DE APROBACIÓN

TESIS DE MAGÍSTER

Se informa a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias que la Tesis de Magíster presentada por el candidato.

Marcela Alejandra Valenzuela Saavedra

Ha sido aprobada por la comisión de Evaluación de la tesis como requisito para optar al grado de Magíster en Ciencias Biológicas con mención en Ecología y Biología Evolutiva, en el examen de Defensa de Tesis rendido el día 29 de Diciembre de 2009.

Director de Tesis:

Dr. Patricio Moreno Moncada.....

Comisión de Evaluación de la Tesis

Dr. Luis Felipe Hinojosa.....

Dr. Juan J. Armesto.....



The image shows three handwritten signatures in blue ink. The first signature is at the top, the second is in the middle, and the third is at the bottom. To the right of the signatures is a circular stamp with the text 'FACULTAD DE CIENCIAS', 'BIBLIOTECA CENTRAL', and 'U. DE CHILE'.



Dedicado a mi hija Amanda



AGRADECIMIENTOS

A todos los que hicieron posible la realización de este estudio, principalmente a mi tutor Dr. Patricio Moreno por su invaluable guía, sus constantes críticas y consejos, su paciencia y sus muchas enseñanzas tanto en el ámbito profesional como personal.

A la comisión de tesis Dr. Felipe Hinojosa y Dr. Juan Armesto por sus muchos aportes durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Rodrigo Villa por sus permanentes enseñanzas en el campo de la botánica y por compartir conmigo sus conocimientos de palinología y su amistad. A mi querida amiga Loreto Hernández por todos sus consejos y ayuda diaria. A mi familia que permitió el desarrollo de mis estudios, especialmente a mi madre, que con su apoyo diario ha hecho posible mi desarrollo profesional y personal. A mi querida hija por su paciencia, comprensión e infinito amor.

A los integrantes del Laboratorio de Palinología, Lucía Gonzalorena, Javiera Videla, Carolina Díaz, Ignacio Jara, Oscar Pesce, William Henríquez, J.P. Francois y Esteban Sagredo por su ayuda permanente

Al financiamiento del proyecto Fondecyt 1070991 y al Instituto de Ecología y Biodiversidad, A Thomas Guilderson de Lawrence Livermore National Laboratory. A la ayuda en terreno de Don Nelson García, Rodrigo Villa, Andrés Westermeyer, Christopher Moy y Roberto Flores.

A la Dr. Cathy Whitlock, por recibirme en su laboratorio y permitir mi perfeccionamiento en el análisis de carbón fósil.

Y a todos mis compañeros y amigos que me han apoyado y acompañado desde que ingrese a la universidad.



INDICE DE CONTENIDOS

	Páginas
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE CONTENIDOS	iv
INDICE DE FIGURAS	vii
INDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUCCION	1
1.1. Variabilidad climática durante los últimos 3000 años	4
1.2. Polen fósil y Reconstrucciones de Regímenes de fuego	7
1.3. Objetivos	11
1.4. Hipótesis de Trabajo	13
2. ÁREA DE ESTUDIO: REGIÓN DE LOS LAGOS, CHILENA	15
2.1. Sitios de Estudio	23
3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1. Muestreo	24
3.2. Análisis de Sedimentos	24
3.3. Cronología	26
3.4. Procesamiento y Análisis de Partículas Macroscópicas de Carbón	26
3.5. Procesamiento y Análisis Polínico	28
3.6. Procesamiento y Análisis de Partículas Microscópicas de Carbón	29



	Páginas
4. RESULTADOS	30
4.1. LAGO CAMPANARIO	30
4.1.1 Registro Sedimentario	30
4.1.2 Geocronología	30
4.1.3 Análisis Polínico de Lago Campanario	32
4.1.4 Análisis de Partículas Microscópicas de Carbón	38
4.1.5 Análisis de Partículas Macroscópicas de Carbón	40
4.2. LAGO REFLEJOS	43
4.2.1. Registro Sedimentario	43
4.2.2. Geocronología	44
4.2.3. Análisis Polínico de Lago Reflejos	46
4.2.4. Análisis de Partículas Microscópicas de Carbón	53
4.2.5. Análisis de Partículas Macroscópicas de Carbón	54
5. DISCUSIÓN	58
5.1. LAGO CAMPANARIO	58
5.1.1. Cambios Vegetacionales	58
5.1.2. Regímenes de Perturbación	59
5.2. LAGO REFLEJOS	62
5.2.1. Cambios Vegetacionales	62
5.2.2. Regímenes de Perturbación	64

	Páginas
5.3. COMPARACIÓN ENTRE SITIOS	67
5.3.1.Cambios Vegetacionales	67
5.3.2.Depositación de Tefras	68
5.3.3.Actividad de Fuego	70
5.3.4.Asentamientos Humanos y Colonización Europea	71
5.4. INTERPRETACIÓN PALEOCLIMÁTICA E IMPLICANCIAS	72
6. CONCLUSIONES	77
7. BIBLIOGRAFIA	80





INDICE DE FIGURAS

	Páginas
1. Mapa simplificado de la porción sur de la Región de los Lagos	17
2. Mapa de las inmediaciones de los sitios de estudio	25
3. Columna estratigráfica maestra de Lago Campanario	31
4. Modelo de edad del registro de Lago Campanario	32
5. Diagrama de porcentajes de polen de coníferas de Lago Campanario	35
6. Diagrama de porcentaje de polen arbóreo de Lago Campanario	36
7. Diagrama de porcentaje de polen no arbóreo de Lago Campanario	37
8. Tasas de acumulación de partículas microscópicas y macroscópicas de carbón de Lago Campanario	39
9. Análisis de la serie temporal de tasas de acumulación de partículas macroscópicas de carbón y densidad de materia inorgánica de Lago Campanario	41
10. Análisis de la Tasa de acumulación de carbón macroscópico de Lago Campanario a través de CharAnalysis	42
11. Columna estratigráfica maestra de Lago Reflejos	44
12. Modelo de edad del registro sedimentario de Lago Reflejos	45
13. Diagrama de porcentajes de polen de Coníferas de Lago Reflejos	50
14. Diagrama de porcentajes de polen Arbóreo de Lago Reflejos	51
15. Diagrama de porcentajes de polen no arbóreo de Lago Reflejos	52
16. Registro de partículas macroscópicas y microscópicas de carbón del registro sedimentario de Lago Reflejos	54
17. Análisis de la serie temporal de Tasas de acumulación de partículas macroscópicas de carbón y densidad seca de materia inorgánica de Lago Reflejos	55
18. Análisis de la tasa de acumulación de carbón macroscópico de Lago Reflejos con CharAnalysis	57

INDICE DE TABLAS

	Páginas
1. Cronologías de anomalías climáticas descritas sobre la base de registros paleoclimáticos desarrollados en el Hemisferio Norte	7
2. Dataciones radiocarbónicas en el registro sedimentario de Lago Campanario	31
3. Resumen de ensamblajes dominantes en las zonas polínicas de Lago Campanario	38
4. Dataciones radiocarbónicas realizadas en el registro sedimentario de Lago Reflejos	45
5. Resumen de ensamblajes dominantes en las zonas polínicas de Lago Reflejos	48



RESUMEN

Una alta variabilidad climática ha sido descrita en la literatura durante el Holoceno y principalmente durante los últimos milenios. Numerosos registros paleoambientales han reportado anomalías climáticas conspicuas principalmente en el Hemisferio Norte durante los últimos 2000 años. A su vez, síntesis globales y del sur de Sudamérica, que documentan la actividad de fuego, han detectado incrementos en la variabilidad climática y ocurrencia de paleofuegos durante los últimos ~3000 años, existiendo aún un conocimiento limitado de las asociaciones entre clima, vegetación, fuego y actividades antrópicas. El análisis estratigráfico de alta resolución de sedimentos lacustres, polen fósil y partículas de carbón de Lago Reflejos (41°33'S, 72°35' W, 800 m.s.n.m) y Lago Campanario (41.6° S, 72.2° W, 47 m.s.n.m), ubicados en la Región de los Lagos chilena, permiten detectar las posibles asociaciones espacio-temporales entre clima, vegetación y fuego, posibilitando descifrar el rol de agentes de perturbación como actividades antrópicas o eventos volcánicos sobre los cambios vegetacionales y los eventos de fuego en la Región de los Lagos durante los últimos 3000 años. Es en el contexto de esta variabilidad climática milenial y submilenial, que el examinar con detalle los cambios e interrelaciones entre vegetación, clima, fuego permitirá abordar preguntas como i) ¿Cuál es la dirección y cronología de cambios vegetacionales y climáticos en la Región de los Lagos durante los últimos 3000 años? ii) ¿Cuáles son las relaciones entre vegetación, clima, ocurrencia de fuego y regímenes de perturbación como eventos volcánicos y actividades antropogénicas?, iii) ¿Existe sincronía de las señales inferidas con las anomalías climáticas descritas en el Hemisferio Norte durante este periodo?. Los registros de polen y carbón de alta resolución analizados en esta tesis permiten caracterizar cambios en la vegetación y variaciones en los regímenes de fuego, los que se evidencian principalmente en las zonas bajas del área de estudio. Los datos sugieren que variaciones en las condiciones climáticas, principalmente asociadas a variaciones en el régimen de precipitación, son uno de los principales reguladores de los

cambios vegetacionales y de los eventos de fuego en los sitios de estudios. Son inferidas condiciones cálidas con disminución de precipitaciones entre 3200-2200 años cal AP, entre 2200-1300 años cal AP se registra ausencia de fuego y aumento de precipitaciones las que son seguidas por condiciones más secas entre 1300 y 750 años cal AP, asociadas a intensa actividad de fuego. Un aumento de precipitaciones es inferido entre 750 y 500 cal kyr BP con disminución en los eventos de fuego y durante los últimos 500 años condiciones templado-cálidas y cambios vegetacionales relacionados con actividades antrópicas. La variabilidad climática multicentenal observada en los sitios de estudio puede relacionarse con la alternancia de condiciones secas/cálidas y/o frías/húmedas descrita principalmente en el Hemisferio Norte. La vegetación muestra escasa respuesta a la depositación de tefras sin evidencia estratigráfica de que los eventos volcánicos fueran causantes directos de cambios vegetacionales en los sitios de estudio, mientras que es posible observan asociaciones estratigráficas entre eventos de fuego puntuales y depositación de tefras principalmente entre 1500-3000 años cal AP, tramo temporal que registra baja actividad de fuego local y regional. Periodos de alta actividad de fuego (~1200-600 y ~400-0 años cal AP) muestran disminución de taxa arbóreos como *Nothofagus* junto con aumento porcentual de hierbas, Poaceae (posiblemente *Chusquea*) y taxa termófilos como *Eucryphia/Caldcluvia*. Durante los últimos 350 años se observa expansión de taxa asociables a perturbación (como *Rumex* y *Plantago*) y un aumento de eventos locales de fuego asociados cronológicamente a relatos y documentos históricos que describen la colonización europea de la Región de los Lagos

ABSTRACT

A high climatic variability during the Holocene has been described in the literature and principally during the last millennium. Several paleo-environmental records have reported evident climatic anomalies during the last 2000 years, mainly in the Northern Hemisphere. At the same time, global and southern South American syntheses, that document fire activity, have detected increases in the climatic variability and in the occurrence of paleofire during the last ~3000 years, still having a limited knowledge of associations between climate, vegetation, fire and human activities. The high-resolution stratigraphic analysis of lake sediments, pollen and charcoal in the Reflejos lake (41°33'S, 72°35' W, 800 a.s.l.) and the Campanario lake (41.6° S, 72.2° W, 47 a.s.l.), both located in the Chilean Lake District, detects potential spatial-temporal coupling between climate, vegetation and fire making it possible to decipher the role of disturbance agents such as anthropogenic or volcanic activities on vegetation changes and fire events in the Chilean Lake District during the last 3000 years. It is within this context of millennial and submillennial climate variability, that examining in detail the changes and relationships between vegetation, climate, and fire will address questions such as: i) ¿What is the direction and timing of vegetation and climate changes in the Chilean Lake District during the last 3000 years?, ii) ¿What are the relationships between vegetation, climate, fire occurrence and disturbance regimes such as volcanic event and anthropogenic activities? iii) ¿Does any synchrony exist between the signals inferred and the climatic anomalies described during this period in the northern Hemisphere? The pollen and the high-resolution charcoal records analyzed in this thesis allow to characterize changes in vegetation and fire regimes, which are particularly evident in the lower zone of the studied area. The data suggest that variations in the climatic conditions, mainly associated to variations in the rainfall regime, are one of the main regulators of vegetation changes and fire events in the sites of study. Warm conditions with reduced precipitation between 3200-2200 cal yr BP are inferred, recorded absence of fire and increased rainfall between 2200-1300 cal yr BP, which are followed by drier conditions

between 1300 and 750 cal yr BP, associated to intense fire activity. Increased precipitation for 750 to 500 cal yr BP with a decrease in events of fire and, for the past 500 years, warm-temperate conditions and vegetation changes associated with human activities are inferred. The multi-centennial climate variability observed in the studied sites may be related to the alternation of dry/warm or cold/wet conditions described principally for the Northern Hemisphere. The vegetation shows little response to the deposition of tephra with no stratigraphic evidence that volcanic events were the direct cause of vegetation changes in the studied sites. On the other hand, it is possible to observe stratigraphic associations between specific fire events and deposition of tephra, mainly between 1500-3000 cal yr BP, when there is low activity of local and regional fire. High fire activity periods (~1200-600 and 400-0 cal yr BP) show a decline of tree taxa such as *Nothofagus* with an increase in the percentage of herbs, Poaceae (probably *Chusquea*) and thermophilous taxa (*Eucryphia/Caldcluvia*). It is observed that during the last 350 years, an expansion of taxa related to disturbance (*Rumex* and *Plantago*) and an increase of local fire events associated chronologically to stories and historical documents describing the European colonization of the Chilean Lake Districts has occurred.

1. INTRODUCCIÓN

Numerosos registros paleoambientales e instrumentales han detectado un incremento de las temperaturas medias globales desde mediados del siglo XIX, cuya rapidez ha sido aun mayor en las últimas décadas del siglo XX (Mann et al. 1999), este incremento ha sido acompañado por disminuciones de circulación de la celda de Walker (Vecchi et al. 2006), cambios en los regímenes de precipitación y ocurrencia de eventos extremos como huracanes (IPCC, 2007). El incremento observado en las temperaturas ha sido considerado por algunos estudios como un calentamiento sin precedentes en el contexto del último milenio (Mann et al. 1999), en cambio para otros, corresponde a un ciclo más dentro de la alta variabilidad del clima Holocénico (Esper et al. 2002; Soon et al. 2003). Este nuevo escenario ha aumentado el interés por comprender la variabilidad climática de nuestro planeta y decidir políticas globales para que la sociedad pueda afrontar los nuevos escenarios climáticos.

Actualmente muchos esfuerzos científicos se han focalizado en entender los mecanismos y forzantes de la variabilidad climática, para lo cual es necesario comprender como se ha comportado dicha variabilidad en el pasado. El desarrollo de estudios paleoecológicos otorga la posibilidad de entender cómo funciona y ha funcionado el sistema climático bajo diversas condiciones de borde y cuál ha sido la respuesta de la biota a estas variaciones. Este conocimiento permitirá comprender las variaciones climáticas actuales y diferenciar cómo han sido modificadas o provocadas por actividades humanas y cuáles pueden corresponder a mecanismos y variabilidad natural.

A pesar de la estrecha relación entre el desarrollo de las sociedades humanas y la variabilidad climática, esta interacción ha sido escasamente estudiada pese a su relevancia histórica (Mayewski et al. 2004), siendo limitados los conocimientos que se tienen sobre cambios climáticos en relación a extensión, magnitud, recurrencia, origen de las señales y mecanismos

de propagación. La literatura ha reportado registros paleoambientales que presentan variaciones sub-mileniales conspicuas, principalmente en el Hemisferio Norte durante los últimos milenios (Soon et al. 2003, Bradley et al 2003, Jones & Mann, 2004, Mann et al. 2009, Bianchi & McCaven 1999, Mc Dermontt et al. 2001, Desprat et al. 2003, Hu et al. 2001, Ji et al. 2005, Linderholm & Gunnarson 2005). dentro de las cuales existen períodos con anomalías frías de temperatura, como la Pequeña edad de Hielo (LIA), entre ~650–50 años cal AP (Soon et al. 2003) o el Período frío de la Edad Oscura (DACP) datado entre ~1450–950 años cal AP (Bianchi & McCaven 1999) y otros cálidos/secos como el denominado Período Cálido Medieval (MWP) entre ~1150–650 años cal AP (Soon et al. 2003) o el Período Cálido Romano (RWP) datado entre ~2050–1950 años cal AP (Bianchi & McCaven 1999) ver sección 1.1). Registros paleoclimáticos de las latitudes medias del Hemisferio Sur pueden ser útiles para determinar la globalidad de estas anomalías y comprender la interacción entre gatillantes tropicales y extratropicales de la variabilidad climática durante, por ejemplo, el último milenio.

Distintos indicadores de cambio paleoambiental (anillos de árboles, testigos de hielo, polen fósil, corales, registros isotópicos, partículas de carbón, entre otros) han sido utilizados para reconstruir el clima pasado. El desarrollo tecnológico reciente ha aumentado la capacidad de resolución de muchos de ellos, permitiendo analizar las posibles relaciones entre variables, procesos y componentes climáticos (temperatura, precipitación, vegetación, fuego, CO₂, etc.).

La utilización de partículas de carbón como indicador de cambios paleoambientales (ver sección 1.2) ha aumentado en las últimas décadas, lo que ha permitido desarrollar un nuevo campo dentro de la paleoecología. Algunos estudios y síntesis recientes discuten la influencia de la variabilidad climática en la ocurrencia de eventos de fuego en el sur de Sudamérica (Whitlock et al. 2007, Abarzúa & Moreno 2008, Power et. al. 2008). Estos estudios detectan variabilidad en el clima y en la ocurrencia de paleoincendios durante los últimos ~3000 años, lo que podría

asociarse con la posición e intensidad de los vientos del oeste a escalas de tiempo milenial, sub-milenial e interanual. Sin embargo, no se ha abordado de manera explícita y sistemática las relaciones recíprocas entre cambios en el clima, vegetación, fuego y perturbaciones como actividad volcánica o efecto antropogénico. Por ello se hace necesario generar registros de alta resolución espacial y temporal a fin de comprender estas relaciones y distinguir la influencia climática de la antropogénica en los regímenes de fuego (Moreno, 2002).

La presente tesis se desarrolla en la Región de los Lagos, zona que cuenta con gran disponibilidad y abundancia de registros sedimentarios, que la configuran como un área propicia para el estudio de la estructura y cronología de los cambios climáticos desde la última edad de hielo hasta nuestros días (Moreno, 2002), además corresponde a una de las zonas con mayor cantidad y calidad de información paleoambiental a nivel continental (Villagrán 1985, 1988, 1991, Heusser 1966, 1974; Heusser et al. 1996, 1999, Moreno 1997, 2004, Moreno et al. 1999, 2001). Esta Región ha sido objeto de fuerte ocupación humana principalmente desde 1850 AD la cual ha modulado fuertemente el paisaje, además presenta un gran número de volcanes cuyas erupciones han acumulado considerables depósitos de cenizas y escorias de diferente composición y edades (Besoain y col. 2000) (ver sección 2).

El estudio que se presenta a continuación busca examinar en detalle los cambios y posibles interrelaciones entre regímenes de fuego, vegetación y clima, diferenciando patrones regionales de condiciones sitio-específicas durante los últimos 3000 años en la Región de los Lagos junto con evaluar los posibles efectos de las perturbaciones volcánicas y antrópicas sobre la vegetación y los eventos de fuego. Este esfuerzo permitirá abordar las siguientes preguntas:

- I. ¿Cuál es la dirección y cronología de cambios vegetacionales y climáticos en la Región durante los últimos 3000 años?

- II. ¿Cuáles son las relaciones entre cambio vegetacional, climático y ocurrencia de fuego?
- III. ¿Se observa alguna asociación estratigráficamente distinguible entre actividad volcánica (deposición de tefras) y ocurrencia de fuegos a nivel local?
- IV. ¿Cuál ha sido la respuesta de la vegetación y los regímenes de fuego a perturbación por actividad volcánica y actividades humanas?
- V. ¿Existe sincronía de estas señales con las anomalías climáticas descritas a partir de registros paleoambientales desarrollados en el Hemisferio Norte?

1.1 VARIABILIDAD CLIMÁTICA DURANTE LOS ÚLTIMOS 2000 AÑOS.

Estudios desarrollados en el Hemisferio Norte sobre las variaciones climáticas de los últimos 2000 años describen variabilidad centenal y ocurrencia de anomalías climáticas asociadas principalmente a temperatura. Durante los últimos 1000 años se describe un periodo frío conocido como la Pequeña Edad de Hielo –“Little Ice Age” (LIA, por sus siglas en inglés) entre ~650–50 años cal AP – y uno cálido denominado Periodo Cálido Medieval – “Mediaeval Warm Period” (MWP, por sus siglas en inglés) entre ~1150–650 años cal AP (Soon et al. 2003). Estos eventos se encuentran ampliamente documentados en el Hemisferio Norte, sin embargo no existe consenso respecto a su ocurrencia y eventual sincronía en registros provenientes del Hemisferio Sur.

A partir del estudio de árboles fósiles que murieron a raíz de trasgresiones lacustres y/o crecidas en los caudales de ríos tanto en California (Sierra Nevada, Estados Unidos) como en Patagonia Argentina (Lago Cardiel, Lago Argentino), Stine (1994) dedujo la ocurrencia de

anomalías negativas de precipitación que culminaron a los 830 y 600 años cal AP, las cuales serían contemporáneas con el MWP. Junto con sugerir que este periodo corresponde a un fenómeno global y debido a las diferencias en el tipo de señal climática (anomalías de precipitación versus anomalías de temperatura), Stine denominó este periodo como la Anomalía Climática Medieval "Mediaeval Climate Anomaly" (MCA, por sus siglas en inglés).

Estudios desarrollados en el sur de Sudamérica también han reportado la ocurrencia de estas anomalías climáticas. Mediante el análisis de un testigo de sedimento lacustre proveniente de Lago Puyehue, Región de los Lagos chilena (40° 40'S, 72° 28' W, 187 m.s.n.m.), Bertránd et al. (2005) detectaron un periodo húmedo entre 460–250 años cal AP que correlacionaron con LIA. Por otra parte Moy et al. (2008) reportaron la existencia de variaciones hidrológicas en Lago Guanaco, Torres del Paine (51°52'S, 72°52'W, 200 m.s.n.m.) mediante el análisis de isótopos estables, carbonatos biogénicos y polen fósil, este estudio muestra un período con incremento en la evaporación entre 900 y 550 años cal AP, lo que estaría correlacionado con MCA y mientras que aumentos en el carbonato biogénico y polen de *N. tipo dombeyi* se relacionarían con una intensificación de los vientos del oeste contemporánea con LIA (400-150 años cal AP). Mauquoy et al. (2004) presentan evidencias de condiciones secas interpretadas como un periodo cálido entre 990–930 años cal AP basados en múltiples indicadores paleoambientales (polen, macrofósiles, esporas de hongos), obtenidos a partir de depósitos de turba en un pantano cercano a Ushuaia, sector Argentino de Tierra del Fuego (54° 45'S, 68° 18' W, 180 m.s.n.m.), estos autores postulan que esta condición climática correspondería a MWP y que por lo tanto el fenómeno sería sincrónico en ambos hemisferios.

Villalba, R. (1990) reconstruyó las temperaturas medias de verano en el sur de Sudamérica utilizando cronologías de anchos de anillos de *Fitzroya cupressoides* en Río Alerce (41° 10'S, 71° 50' W) Argentina, la cual abarcó los últimos 1122 años; de acuerdo a este autor es posible

asociar un periodo cálido entre 1080 y 1250 AD (870-700 años cal AP) con MWP y un periodo frío entre 1280 y 1670 AD (670-280 años cal AP) con LIA.

Registros europeos muestran anomalías climáticas con patrones de cambio similares a LIA y MCA durante el penúltimo milenio, como son un periodo cálido denominado Período Cálido Romano ("Roman Warm Period" [RWP, por sus siglas en inglés] datado entre ~2050–1950 años cal AP) que es seguido por un periodo de bajas temperaturas denominado Período Frío de la Era Oscura ("Dark Ages Cold Period" [DACP, por sus siglas en inglés] datado entre ~1450–950 años cal AP) (Bianchi & McCaven, 1999). McDermott et al. (2001) encuentran evidencia de estos periodos (RWP, DACP, MWP y LIA) en un registro isotópico de espeleotemas del suroeste de Irlanda. Otros registros como reconstrucciones dendrocronológicas de temperaturas de verano en Suecia (Linderholm & Gunnarson 2005), análisis polínicos en España (Desprat et al. 2003) y sedimentos en lago Qinghai (Ji et al. 2005), en China, muestran la presencia de estas 4 anomalías climáticas aunque con variaciones en sus cronologías.

A través del análisis de ostrácodos e isótopos de Carbono y Oxígeno de un testigo de sedimentos extraído de Lago Farewell, ubicado en el noroeste de Alaska, Hu et al. (2001) muestran evidencia de la ocurrencia de las anomalías climáticas descritas en Europa durante los últimos 2000 años. Los autores de ese estudio concluyeron que tanto el RWP como la MCA fueron anomalías climáticas tanto o más cálidas que la observada en la durante el siglo XX, al menos en ese sitio de estudio.

Si bien existen estudios en Sudamérica que discuten la posible ocurrencia de LIA y MWP/MCA, (Stine 1994, Mauquoy et al. 2004, Bertránd et al. 2005, Moy et al. 2008) no existen estudios que evalúen directamente la ocurrencia de RWP y DACP. Es destacable en este sentido la cronología dendroclimática de Lenca (41° 33'S, 72°36' W), Región de los Lagos chilena,

construida a partir de series de Alerce (*Fitzroya cupressoides*) (Lara & Villalba, 1993). Este registro que abarca los últimos 3620 años muestra temperaturas por sobre el promedio entre 80 BC y 160 AD (2030 y 1790 años cal AP) y temperaturas bajo el promedio entre 300-470 AD (1650-1480 años cal AP) y entre 1490-1700 AD (460-250 años cal AP), lo cual sugiere ausencia de correspondencia con RWP, MWP o LIA. La Tabla 1 presenta las distintas cronologías definidas para estas anomalías climáticas a partir de los estudios anteriormente citados.

SITIO	UBICACIÓN	LIA	MWP	DACP	RWP	REFERENCIA
NEAP-15K	56° 21' N, 27° 48' W S de Islandia	~400 (inicio)	1050-700	1450-950	2050-1950	Bianchi & McCaven (1999)
Crag caven CC3	52°15' N, 9° 26' W SW de Irlanda	700-500	1100-700	1450-950	2100-1950	Mc Dermontt et al. (2001)
Ría de Vigo Vir-18	42°14'N, 8°47'W S de Galicia	550-100	1000-550	1500-1000	2200-1500	Desprat et al. (2003)
Lago Farewell	62°33 N, 153°38 W NE Alaska	750-250	1100-750	~1350	1950-1650	Hu et al. (2001)
Qinghai Lake	36°32 N, 99°36 E China	1360-400	1650-850	1800-1650	2100-1800	Ji et al. (2005)
Jämtland	63°10'N, 13°35'E Suecia	400-50	1050-950	1650-1550	1500-1400	Linderholm & Gunnarson (2005)

Tabla 1: Cronologías de anomalías climáticas descritas sobre la base de registros paleoclimáticos desarrollados en el Hemisferio Norte. Se presentan las cronologías de los distintos eventos según distintos autores en años calendarios antes del presente (años cal AP). LIA=Pequeña Edad de Hielo, MWP=Período Cálido Medieval, DACP=Período Frio de la Edad Oscura, RWP=Período Cálido Romano.

1.2 POLEN FOSIL Y RECONSTRUCCIONES DE REGÍMENES DE FUEGO

Registros estratigráficos de polen han sido ampliamente utilizados como indicadores de cambios vegetacionales a través del tiempo en un área determinada. La estrecha relación entre clima y la vegetación ha posibilitado inferir las condiciones climáticas pasadas a partir de registros estratigráficos de polen. Las relaciones entre estratigrafías polínicas y estratigrafías de partículas de carbón preservadas en los sedimentos permiten caracterizar e identificar las respuestas de la vegetación a paleoincendios, posibilitando el estudio de las relaciones fuego-vegetación y fuego-clima en el pasado (Whitlock & Bartlein 2004). A diferencia de otras fuentes

de información sobre la evolución de la actividad de fuego como cicatrices en árboles o registros históricos, el análisis estratigráfico de sedimentos lacustres permite obtener registros continuos de varios miles de años con resolución temporal de décadas entre muestras (Whitlock et al. 2003).

En un año dado la probabilidad de ocurrencia de fuego en un ecosistema está condicionada, entre otros factores, por el material combustible disponible, la precipitación, humedad relativa, temperatura del aire y viento, los cuales influyen en la humedad del combustible y las condiciones para la ignición (Pyne 1996, Whitlock et al. 2007). A largas escalas de tiempo (mileniales, multimileniales) los regímenes de fuego son modulados por condiciones climáticas globales y a menores escalas de tiempo (decadales, centenales, multicentenales) por variaciones del clima a nivel regional, con un aumento en la importancia de las perturbaciones asociadas al crecimiento de poblaciones humanas (Power et al. 2008).

Registros estratigráficos de partículas de carbón (Millsbaugh & Whitlock 1995, Whitlock & Bartlein 2004, Whitlock et al. 2007, Abarzúa et al. 2004, Higuera et al 2007, Power et al. 2008) han sido utilizados para reconstruir regímenes de fuego y, a partir de ello, comprender el rol de este en la dinámica natural de los ecosistemas. En conjunto con estudios palinológicos, los estudios de regímenes de paleofuego proporcionan evidencia sobre la frecuencia y tendencias seculares de los eventos de fuego, así como posibles controles ambientales o culturales (Millsbaugh & Whitlock 1995). Dependiendo de la escala de análisis, los patrones de ocurrencia de fuego en el sur de Sudamérica pueden asociarse a variaciones en la fuerza y localización del sistema de alta presión del Pacífico subtropical, los vientos del oeste y a variabilidad de alta frecuencia como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Kitzberger et al. 2001, Kitzberger. 2002, Whitlock et al. 2007), también pueden ser asociadas a cambios en el ciclo estacional de insolación y la composición atmosférica (Whitlock y Bartlein, 2004, Whitlock et al. 2007).

La acumulación de partículas de carbón en el registro sedimentario depende de las características particulares de los eventos de fuego, así como de procesos de transporte y depositación. De acuerdo al modelo propuesto por Whitlock & Larsen (2002) y Whitlock & Anderson (2002) es posible distinguir dos fuentes de variabilidad a partir de series temporales de variaciones de partículas de carbón macroscópico: carbón primario y secundario. El carbón primario corresponde a la señal estratigráfica generada durante y al poco tiempo después de la ocurrencia de un evento de fuego y, por lo tanto, otorga información respecto a eventos discretos de fuego. El carbón secundario corresponde al componente de variabilidad en una serie temporal adjudicable a procesos de depositación de partículas de carbón macroscópico a través de transporte vía escorrentía y retrabajo interno al interior de la cuenca. En consecuencia, el carbón secundario no representa necesariamente actividad de fuego contemporáneo ni local, sino una señal de baja frecuencia presente en el registro a raíz de su incorporación con posterioridad al evento y/o durante los años sin fuego.

El análisis de los registros de paleofuegos considera que la mayor parte de las partículas macroscópicas (>100 μm de diámetro) tienen un área de dispersión acotada (entre 1 y 10 Km) depositándose cerca de su fuente de origen, de modo que una alta acumulación de partículas en el registro representan ocurrencia de fuegos locales. Partículas de carbón microscópico, es decir aquellas <100 μm , corresponderían entonces a actividad de fuego regional y/o extralocal, debido a que estas partículas pueden ser transportadas a través de largas distancias por el viento (mayores a 10 Km) (Whitlock & Larsen 2002; Whitlock & Anderson 2002, Higuera et al 2007).

El éxito de las reconstrucciones de historias locales de paleofuegos usando análisis de partículas macroscópicas, es demostrado por la correspondencia cronológica encontrada entre los años con eventos de fuegos inferidos a partir de registros preservados y datados mediante

anillos de árbol o registros históricos de incendios y los niveles estratigráficos con abundante presencia de partículas de carbón (Millsbaugh & Whitlock 1995). Aunque existe una limitación temporal asociada a esta calibración debido al rango temporal acotado que cubren los registros históricos y dendrocronológicos y a la necesidad que los eventos de fuego sean lo suficientemente severos como para generar una cicatriz de fuego en los anillos de crecimiento de los árboles.

Una correcta interpretación de las historias locales de fuego reconstruidas a partir de partículas macroscópicas de carbón requiere entender los procesos que controlan la producción, dispersión y acumulación de carbón en los sedimentos. En las últimas décadas distintos estudios se han focalizado en identificar dichos procesos y generar los medios analíticos apropiados para su entendimiento (Long et al. 1998, Whitlock & Anderson 2002, Tinner et al. 2006, Higuera et al. 2007). Estos estudios asumen que la depositación de carbón secundario no es mayor que el aporte del carbón primario, por lo que, a pesar de la redistribución o depositación de partículas en años sin fuego, la depositación de carbón primario será la señal dominante en el registro (Higuera et al 2007). Debido a la ocurrencia de retrabajo en los sedimentos, un muestreo discontinuo sesgará la señal de carbón secundario, pudiendo subestimar (o sobrestimar) este componente en la señal de fuego, es así como una aproximación metodológica adecuada es el muestreo continuo-contiguo de los sedimentos, que posibilita la detección de fuegos locales (carbón primario) (Whitlock y Larsen, 2002).

El análisis de los registros de partículas de carbón preservadas en los sedimentos a través de su tasa de acumulación (número de partículas/cm²/año), permite evaluar la actividad de fuego considerando las diferencias en los regimenes de sedimentación del lago, siendo momentos con una alta tasa de acumulación de partículas indicativa de un aumento en la actividad local de fuego. Otra aproximación es aquella que busca descomponer las series temporales de los

registros de carbón para caracterizar los momentos en que la actividad de fuego aumento de forma significativa. La tasa de acumulación es descompuesta en peaks (máximos discretos) de carbón (C_{peaks}), que representaría la señal de carbón primario y carbón background (C_{back}), el que daría cuenta de las variaciones de baja frecuencia debido al aporte de carbón secundario. Niveles estratigráficos con abundancia de partículas macroscópicas o C_{peaks} que sobrepasen significativamente en un cierto umbral los valores de C_{back} (ver sección 3.4), serán considerados como indicadores de eventos locales de fuego (Whitlock, 2001). Programas como Chaps (Long et al. 1998), Charster (<http://geography.uoregon.edu/gavin/charster/Analysis.html>) y Charanalysis (www.charanalysis.googlepages.com), han sido generados para analizar las series temporales de carbón desde modelos y aproximaciones estadísticas.

1.3 OBJETIVOS

Objetivo General:

Documentar cambios vegetacionales a alta resolución (décadas entre muestras) e inferir condiciones climáticas en la Región de los Lagos durante los últimos 3000 años. El análisis polínico de los sedimentos lacustres será comparado con los regímenes de fuego reconstruidos a partir del análisis de partículas de carbón preservadas en los sedimentos y se evaluará la influencia de la depositación de niveles clásticos de origen volcánico en la vegetación y la ocurrencia de paleofuegos.

Objetivos Específicos:

- Desarrollar un marco estratigráfico y cronológico detallado de los sitios de estudio que permita correlacionar las historias de fuego y los cambios de vegetación en el área de estudio.

- Documentar cambios vegetacionales a partir del análisis polínico de sedimentos lacustres para examinar la asociación temporal de cambios en la vegetación y paleofuegos.
- Obtener un registro de actividad extralocal de eventos de fuego a partir del análisis de partículas microscópicas de carbón depositadas en los sedimentos y comparar este registro con la estratigrafía de alta resolución de partículas macroscópicas de carbón, las cuales entregan información sobre eventos de fuego a nivel sitio-específico.
- Examinar el posible efecto de la depositación de tefras en la vegetación y en los regímenes de fuego.
- Evaluar el efecto de la actividad antrópica en la vegetación y los regímenes de fuego a través del análisis de la recopilación de registros históricos, arqueológicos y de especies vegetales exóticas (*Rumex acetosella*, *Pinus spp.*, *Plantago major*), las cuales pueden ser utilizadas como indicadoras de colonización europea.
- Comparar la cronología de cambios vegetacionales y climáticos desarrollados en el marco de esta tesis con otros registros de similar detalle de la región y con las anomalías climáticas a escala sub-milenial descritas a partir de registros paleoclimáticos desarrollados en el Hemisferio Norte (Periodo Cálido Romano, Periodo frío de la Edad Oscura, Periodo Cálido Medieval y Pequeña Edad de Hielo).

1.4 HIPÓTESIS DE TRABAJO

- Si variaciones climáticas han sido el principal regulador de cambios de vegetación y eventos de fuego en la Región de los Lagos chilena durante los últimos 3000 años, entonces se espera:
 1. A nivel local (sitio-específico): sincronía entre cambios vegetacionales y actividad de fuego, observándose en periodos con intensa actividad de fuego una disminución en el registro polínico de especies asociadas a condiciones más frías y/o húmedas (Bosque Nordpatagónico). Esta hipótesis será evaluada comparando el registro polínico con el registro de partículas macroscópicas de carbón de cada uno de los lagos estudiados.
 2. A nivel regional: una similitud de señales (patrón regional) en los registros polínicos de los sitios de estudio, Lago Campanario (41.6°S, 72.2°W, 47 m.s.n.m) y Lago Reflejos (41.55°S, 72.58°W, 800 m.s.n.m). Se comparará la cronología de cambios observados en vegetación y su asociación con variaciones en la actividad de fuego local y extralocal.
- Si la variabilidad climática a escala milenial y submilenial de los últimos 2000 años descrita a partir de registros paleoclimáticos desarrollados en el Hemisferio Norte tuvo carácter global, entonces debería haber correspondencia cronológica con la señal climática inferida a partir de cambios de vegetación y variaciones en la actividad de fuego de la Región de los Lagos. En la comprobación de esta hipótesis se contrastarán la cronología y dirección de cambio de las anomalías climáticas del hemisferio Norte con los cambios climáticos inferidos de los sitios de estudio.

Otras hipótesis complementarias que serán evaluadas:

- Si el fuego ha sido un agente importante de perturbación de la vegetación en la región a escalas temporales centenales, entonces se espera encontrar un aumento de polen de especies arbóreas (e.g. *Weinmannia trichosperma*, *Tepualia stipularis*, especies del género *Nothofagus*, favorecidas por perturbaciones), arbustivas (*Embothrium coccineum*, etc.) y/o herbáceas (Poaceae, helechos como *Blechnum*) favorecidas por la formación de claros en el bosque durante y/o posteriormente a periodos con alta incidencia de fuego.
- Si los patrones comunes observados en los registros de paleofuego de Lago Campanario y Lago Reflejos corresponden a la expresión de señales climáticas, entonces los registros de partículas microscópicas (actividad de fuego regional) y macroscópicas de carbón (actividad de fuego local) preservadas en los sedimentos presentarán patrones de cambios similares entre sitios.

2. ÁREA DE ESTUDIO: REGIÓN DE LOS LAGOS CHILENA

El área de estudio, la Región de los Lagos del sur de Chile está ubicada entre 39°-42° S (Figura 1). Su configuración postglacial ha estado determinada por procesos glaciales y volcánicos, modelada por cambios en la intensidad, posición, variabilidad y estacionalidad de los vientos del oeste (Moreno & León 2003, Montecinos & Aceituno 2003) y en los últimos siglos por actividades de origen antropogénico.

La vegetación dominante en torno a 41° S, entre 0 y 1.200 metros de altitud en la Región de los Lagos, corresponde a bosques templado-lluviosos (Villagrán 1980, 1993). Factores tales como precipitación, condiciones edáficas, altitud, exposición, frecuencia e intensidad de los eventos de perturbación, ejercen influencias importantes sobre la estructura y composición de las comunidades de bosques. Entre las formaciones de bosques templados lluviosos encontrados en esta área se reconocen:

- (1) Bosque lluvioso Valdiviano. Esta unidad presenta alta diversidad de especies arbóreas, gran heterogeneidad en estructura y asociaciones florísticas, las especies dominantes son *Nothofagus dombeyi*, acompañado de *Eucryphia cordifolia*, *Gevuina avellana*, *Drimys winteri*, *Podocarpus saligna* y *Laurelia sempervirens*, además de *Hydrangea serratifolia*, *Cissus striata* y *Pseudopanax laetevirens* son comunes epifitas de la familia Gesneriaceae. Estas comunidades de bosque se presentan a los 41°S en el valle Longitudinal y bajo 400 metros de altitud en la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes.

- (2) Bosque lluvioso Nordpatagónico. En el área de estudio se encuentra por sobre los 400 metros de altitud en ambas cordilleras. Especies arbóreas características de esta comunidad son *Nothofagus dombeyi*, *N. betuloides*, *Laurelia philippiana*, *Drimys winteri*, *Amomyrtus luma* y *Weinmannia trichosperma*. Sobre los 600 metros de altitud son comunes también las coníferas *Podocarpus nubigena*, *Saxegothaea conspicua*, *Fitzroya cupressoides* y *Pilgerodendron uviferum*.
- (3) Bosque subantártico caducifolio. Esta formación del bosque templado aparece cerca del límite arbóreo andino, entre los 1.000 -1.200 m.s.n.m en el área de estudio. Las especies arbóreas dominantes son *Nothofagus pumilio* y *N. antarctica*, acompañados por *Drimys andina*, *Escallonia alpina* y *Maytenus disticha* en el estrato arbustivo (Villagrán, 1993).

Los bosques templado-lluviosos en la Región de los Lagos se establecieron a continuación del término de la última glaciación hace ~17.000 años y han experimentado importantes variaciones en sus componentes a raíz de frecuentes cambios ambientales, con el establecimiento de condiciones de mosaico entre especies de bosque Valdiviano y Nordpatagónico en los sectores bajos del sector continental e Isla Grande Chiloé hace unos 6000 años (Abarzúa et al. 2004, Moreno & León 2003, Moreno 2004).

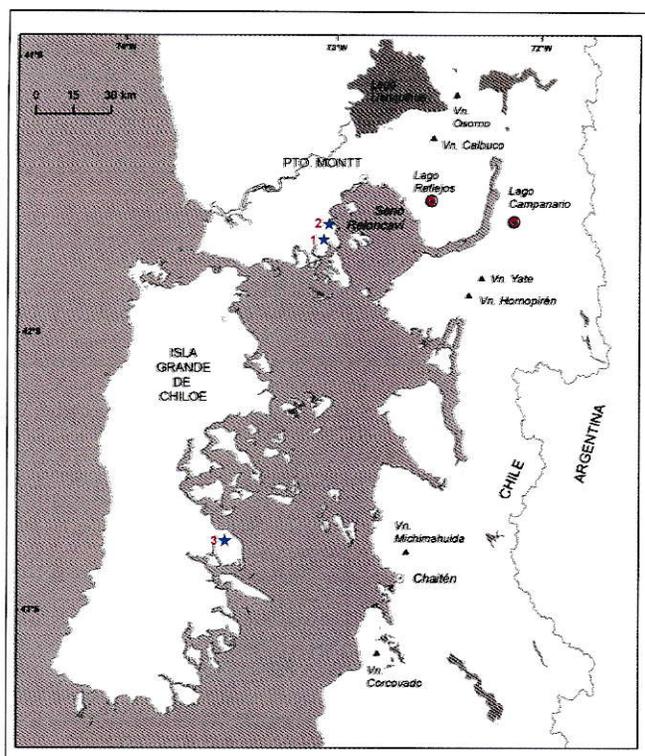


Figura 1. Mapa simplificado de la porción sur de la Región de los Lagos mostrando la ubicación de los sitios de estudio y otras localidades discutidas en el texto: 1) Lago Condorito, 2) Huelmo y 3) Lago Mellí.

La utilización de polen fósil como indicador de condiciones vegetacionales y climáticas pasadas en la Región de los Lagos, presenta algunas limitaciones importantes, principalmente debido a la gruesa resolución taxonómica que se puede lograr; algunos taxa pueden ocupar mas de un tipo vegetacional o bien, pueden incluir varias especies. Un ejemplo de esta dificultad es el género *Nothofagus* el cual presenta 9 especies que cubren un amplio rango de distribución y de ensambles vegetacionales (Veblen & Schlegel, 1982; Donoso, 1987; Ramírez, 1987), sin embargo sólo es posible diferenciar dos tipos polínicos a partir de las características morfológicas del grano de polen: *Nothofagus* tipo *dombeyi* que incluye a *N. dombeyi*, *N. nitida*, *N. pumilio*, *N. antarctica*, *N. betuloides* y *Nothofagus* tipo *obliqua* que incluye *N. obliqua*, *N. glauca* y *N. alpina*. Situación similar es observada en *Eucryphia cordifolia* y *Caldcluvia paniculada*, *Gevuina avellana*, *Lomatia ferruginea* y en las coníferas *Fitzroya cupressoides* y

Pilgerodendron uviferum los cuales se agrupan en los morfotipos *Eucryphia/Caldcluvia*, *Lomatia/Gevuina* y *Fitzroya/Pilgerodendron*, respectivamente.

Desde los trabajos pioneros de Schmithüsen (1956) y Oberdorfer (1960) muchos autores han contribuido al conocimiento fitosociológico, florístico, ecológico y clasificación de tipos forestales de la vegetación en la región aportando valiosa información para una correcta interpretación climática de los ensambles vegetacionales (Veblen & Schlegel, 1982; Donoso, 1987; Ramírez, 1987; Villagrán 1985, 1987). Especies del género *Nothofagus* están presentes en todas las formaciones vegetacionales de los bosques templados lluviosos encontrados en el área de estudio. *N. dombeyi* posee el rango más amplio de distribución (Donoso, 1987) siendo su principal limitante la humedad (Donoso, 2006), y ha sido caracterizado como especie colonizadora de suelos volcánicos y tefras o en áreas de derrumbes y deslizamientos de tierra (Veblen 1985, 1989; Villagrán 1993) características compartida por *Eucryphia cordifolia* y *Weinmania trichosperma*. *N. nitida* se desarrolla en condiciones de alta humedad y temperaturas relativamente bajas (Donoso, 2006) De acuerdo a Veblen & Schlegel (1982) las especies *Fitzroya cupressoides* y *Pilgerodendron uviferum* se establecen en suelos de mal drenaje, áreas de vegas y laderas rocosas, cercanas al límite arbóreo.

Durante el desarrollo de este estudio se utilizarán taxa indicadores para caracterizar las condiciones climáticas. Dentro de ellos tenemos a *Eucryphia/Caldcluvia*, *Lomatia/Gevuina* y *Aextoxicon punctatum*, las cuales son especies termófilas tolerantes o semitolerantes a la sombra que se desarrollan predominantemente en el bosque valdiviano actual bajo veranos relativamente cálidos y secos. Condiciones relativamente más húmedas y templadas serán identificadas por la presencia de *N. tipo dombeyi*, *W. trichosperma* [las cuales además son resistentes a sequías e intolerantes a la sombra (Villagrán, 1988)]. *Podocarpus nubigena*, *Tepualia stipularis*, *Drimys winteri* y *Fitzroya/Pilgerodendron* toleran suelos de mal drenaje y/o

anegados, siendo intolerantes a la sombra. *Saxegothaea conspicua* es una especie resistente al frío y tolerante a la sombra (Veblen & Schlegel, 1982, Villagrán 1985, 1988). Un género típico de sucesión secundaria en los bosques es *Chusquea*, presente en todos los tipos forestales. Aunque está presente en bosques vírgenes, se vuelve dominante en términos de cobertura en bosques alterados y en zonas de baja altura alteradas por fuego (Veblen & Schlegel, 1982), mientras que en otras áreas de la región Poaceae expande principalmente en áreas abiertas y la acuática *Isoetes savatieri* crece sumergida en los bordes de los lagos (com. Pers. P. Moreno y R. Villa).

El clima actual en la región de los Lagos chilena es templado-lluvioso. Los registros pluviométricos anuales varían entre 1300 mm en la depresión intermedia y zonas bajas hasta 4000 mm en las cuencas cordilleranas costeras y andinas, sin que la estaciones meteorológicas registren ningún mes con valores inferiores a 40 mm de agua caída (Dirección Meteorológica de Chile). En el área de estudio (Fig. 1) las precipitaciones son producidas por frecuentes sistemas frontales que cruzan la región. Los cambios latitudinales de los vientos del oeste en la región sur oriental del océano Pacífico resultan de la interacción entre la célula de alta presión pacífica subtropical y el cinturón de baja presión polar. Las variaciones estacionales en el gradiente de temperatura del ecuador fuerzan un desplazamiento hacia el norte del anticiclón del Pacífico, que permite la penetración de los frentes a Chile central (31° S) durante los meses de invierno. Durante el verano, el anticiclón subtropical del Pacífico se intensifica forzando a los vientos oeste a permanecer al sur de los 38° S dando lugar a un gradiente de precipitación de verano que desaparece totalmente hacia el norte de los 31° S y disminuye en la Región de los Lagos debido a una frecuencia más baja de los frentes y la intensificación del efecto de sombra de lluvia causado por la Cordillera de la Costa (Aceituno et al. 1993; Miller, 1976).

Las variaciones interanuales en las precipitaciones a lo largo de Chile están fuertemente asociadas a eventos El Niño; durante estos episodios hay aumento en la precipitación de invierno entre 30° y 35° S, mientras que se observa un déficit de precipitación entre los 38° y 41° S durante el verano siguiente, cuando El Niño alcanza su desarrollo máximo. La tendencia de condiciones relativamente secas durante episodios El Niño se asocia a mayor frecuencia de anomalías de circulación anticiclónica (Montecinos & Aceituno 2003), por otra parte, durante eventos La Niña ocurren anomalías positivas de precipitación, asociadas a mayor frecuencia de sistemas de baja presión que cruzan el extremo sur del continente.

Una característica importante de la Región de los Lagos chilena es el alto número de volcanes presentes en la zona. El cinturón de los Andes Meridionales, que se extiende entre 33° y 45° S tiene 19 volcanes activos, constituyendo la región volcánica de mayor vigor eruptivo en Chile (González-Ferrán, 1995). En el área cercana a los sitios de estudio L. Campanario y L. Reflejos se encuentran los volcanes Calbuco (41°20'S, 72°37'W), Apagado (41°53'S, 72°35'W), Hornopirén (41°53' S, 72°26' W) y Yate (41°47'S, 72°23'W) (Figuras 1 y 2). Estos Volcanes han tenido fuerte actividad Holocénica (Besoin y col. 2000) aunque los registros relativamente continuos comienzan a mediados del siglo XVII (González-Ferrán, 1995). El Volcán Calbuco ha registrado varias erupciones en tiempos históricos (1872-1893-1917-1929-1961 AD), Volcán Apagado no registra actividad reciente, sólo un reconocimiento de lavas negras en la costa de Hualaihué en 1872 AD (Petit-Breuilh, 1995), Volcán Hornopirén no presenta registros históricos de actividad previo al siglo XIX, hay relatos respecto a erupciones en el año 1835 AD y eventualmente en 1872 AD (Petit-Breuilh, 1995) y el volcán Yate no registra actividad volcánica en tiempos históricos (Petit-Breuilh, 1995), se trata de un volcán apagado e inactivo, aunque se han descrito dos flujos aluvionales en la ladera norte del volcán, en 1896 AD y 1871 AD.

Otro agente importante en la actual distribución de la vegetación en la Región de los Lagos son los asentamientos humanos. Existen registros de ocupaciones humanas en el área desde ~14.000 años cal AP como lo sugieren hallazgos en el sitio arqueológico Monte Verde (41° 30 S, 73° 15 W) (Dillehay, 1989). La ocupación del borde costero de la región está representada por numerosos conchales de origen antropogénico, representantes del poblamiento ancestral. Muñoz & Pino (2002) describen un número importante de sitios arqueológicos en Seno Reloncaví e Isla Grande de Chiloé, como los sitios Ilque, Piedra Azul y Puntilla Tenglo, con edades de 4280, 4080 y 4250 años cal AP, respectivamente.

Según Heusser (1994) las actividades de paleoindios durante el Holoceno serían el principal agente de ignición en el sur de Sudamérica en áreas donde la ocurrencia de tormentas eléctricas y erupciones volcánicas es escasa o con un área de influencia restringida. Estudios palinológicos desarrollados en el centro y sur de Chile han propuesto que la presencia de abundante carbón y en registros polínicos han estado asociados fuertemente a ocupaciones humanas durante los últimos 3000 años (LeQuesne, et. al. 1999; Villa-Martínez, et. al. 2003, Abarzúa & Moreno, 2008).

Otro componente importante en la ocupación humana en la Región de los Lagos corresponde a la colonización española y posteriormente alemana. Los colonos españoles se establecieron en la región en el año 1544 AD (406 años cal AP) encabezados por Juan Bautista Pastene, al lugar bautizado como Bahía San Pedro (41°S, en actual comuna de Purranque, provincia de Osorno) (Rothhammer et al. 2000). Diversas evidencias y relatos históricos dan cuenta de la existencia de numerosa población indígena en la zona a la llegada de los españoles (Otero, 2006)

En el año 1846 AD (104 años cal AP) comenzó la llegada de colonos alemanes, sin embargo el proceso de colonización propiamente tal comenzó en 1850 AD fomentado por una política de estado reimpulsada por Vicente Pérez Rosales (Tampe, 2003). Relatos históricos como los de Felipe Gómez de Vidaurre en el año 1748 AD describen la utilización que los colonos dieron al fuego para combatir a los pueblos indígenas y con el fin de crear asentamientos y tierras para cultivo (Elizalde, 1970). Con el establecimiento de nuevos habitantes en la zona, se dio paso al desarrollo de la ganadería y a la introducción de especies vegetales exóticas como *Rumex acetosella*, *Plantago* y *Pinus* sp.

Power et al. (2007) a través de una síntesis global de registros de fuego desde el Último Máximo Glacial hasta el presente, muestra evidencia de una relación positiva entre poblaciones humanas y fuego, aunque el rol de la actividad antrópica como causa o supresor de la actividad de fuego requiere de un mejor entendimiento de los cambios en los regímenes de fuego y de su relación con el clima.

Documentar la variabilidad histórica y prehistórica de los patrones de fuego posibilita evaluar la influencia antropogénica y/o climática junto con la influencia o dependencia de los cambios vegetacionales. El entendimiento de los posibles forzantes de paleofuegos requiere una cronología detallada de los cambios paleoambientales lo que permita detectar posibles asociaciones espacio-temporales. Pocos estudios en la Región de los Lagos chilena han abordado dichas relaciones. El primero de ellos, el registro de Lago Condorito (41°45'S, 73°07'W, Figura 1) ubicado en la porción sur del Valle Longitudinal, muestra cambios en la vegetación como un aumento de *Weinmannia trichosperma* y *Tepualia stipularis*, junto con una declinación de taxa arbóreas como *Nothofagus* tipo *dombeyi* y *Podocarpus nubigena*, acompañados por aumento en las tasas de acumulación de partículas de carbón (Moreno, 2000) entre 12.500 y 11.000 años cal AP. Un patrón semejante es observado en el sitio Huelmo

(41°31'S, 73°00'W), donde la expansión de *W. trichosperma* es acompañada por un ligero aumento en Poaceae y una baja en la mayoría de los árboles, arbustos y helechos epífitos, seguido de un aumento de *T. stipularis*, asociado a tasas máximas de acumulación de carbón entre los 13.000 y 8.000 años cal AP (Moreno & León, 2003). Relaciones similares fueron encontradas en Lago Melli (42°46'S, 73°33'W, 70 m.s.n.m) ubicado en Isla Grande de Chiloé (IGC) durante los últimos 6000 años (Abarzúa & Moreno 2008). Estas asociaciones podrían representar la utilización de nuevos sustratos y claros generados por los incendios en los bosques por parte de estas especies. Estudios ecológicos en matorrales de IGC muestran que la colonización y expansión de especies pioneras sombra intolerantes como *Embothrium coccineum* o *Nothofagus nitida* junto con *Drimys winteri* en sustratos post fuego estaría fuertemente limitada por otros factores como acceso a la luz y anegamiento de sustratos (Díaz & Armesto 2007).

2.1 SITIOS DE ESTUDIO.

L. Campanario (41.6°S, 72.2°W) es un pequeño lago de ~2 hectáreas a 47 m.s.n.m (Figuras 1 y 2), con batimetría simple de una sola depresión cóncava y una profundidad de 6 metros de agua, se ubica sobre un promontorio de roca madre, represado por una morrena sobre el valle de río Puelo, gracias a ello esta cuenca está hidrológicamente aislada del sistema fluvial lo cual ha permitido la sedimentación pelágica lacustre in situ sin interferencias alóctonas. Este lago está rodeado de vegetación asociada a la formación de bosque templado Valdiviano. En la actualidad existe gran presencia de hierbas en las áreas cercanas al lago relacionada a la presencia de zonas de pastoreo.

L. Reflejos (41.55°S, 72.58°W) corresponde a un lago pequeño de cuenca cerrada ubicado a 800 m.s.n.m. en la base lateral de un circo glacial, cercano al Parque Nacional Alerce Andino en

la localidad de Lenca, Región de los Lagos (Figura 1 y 2). Con una profundidad máxima de 5.6 metros de agua, está rodeado de bosque Nordpatagónico con abundante presencia de coníferas, en sus alrededores encontramos *Fitzroya cupressoides*, *Drimys*, *N. dombeyi*, *N. nitida*, *Desfontainea spinosa*, *Astelia pumila*, *P. nubigena*, *S. conspicua*, *Pernettya*, y Poaceae como *Chusquea*.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MUESTREO

Se utilizaron testigos sedimentarios obtenidos a partir de dos lagos ubicados en el área cercana a Seno y Estuario Reloncaví (Figura 2) en la Región de los Lagos. Los sitios estudiados, Lago Campanario (41.6°S, 72.2°W, 47 m.s.n.m.) y Lago Reflejos (41.55°S, 72.58°W, 800 m.s.n.m) se ubican en pequeñas cuencas cerradas que maximizan la señal paleoclimática local, permitiendo examinar en detalle relaciones entre cambios de vegetación, clima y regímenes de fuego. Los testigos de sedimento de ambos lagos se obtuvieron mediante un barreno de pistón de barra cuadrada (Wright et al. 1984, Wright, 1967) y el testigo de interfase agua-sedimento (denominado testigo SC) mediante un barreno de pistón de plexiglas.

3.2 ANÁLISIS DE SEDIMENTOS

La caracterización estratigráfica de la columna sedimentaria se realizó mediante radiografías digitales, observaciones litológicas y análisis de Pérdida por Ignición (PPI). Este último consiste en la quema sucesiva de muestras de 1 cc de sedimentos con el fin de cuantificar los porcentajes de agua, materia orgánica, siliciclastos y carbonatos, además de los respectivos valores de densidad seca.

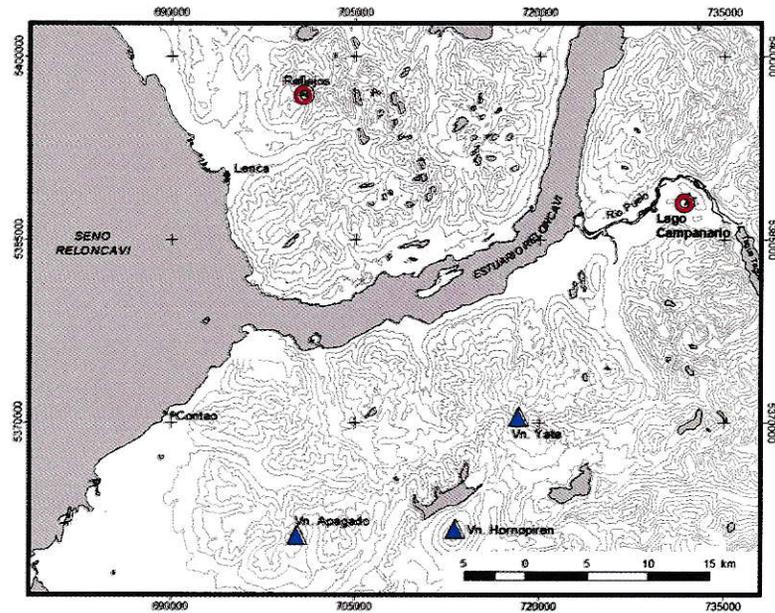


Figura 2. Mapa de las inmediaciones de los sitios de estudio, Lago Campanario y Lago Reflejos. Se muestran además los volcanes cercanos citados en el texto

Se extrajeron muestras de 1 cc en cada centímetro de longitud de los testigos, las que fueron pesadas y enfriadas a temperatura ambiente en una cámara de vacío entre cada una de las distintas fases que se detallan a continuación. Las muestras fueron deshidratadas en una estufa SHELDON 1370 GX a 105°C durante una noche, posteriormente se realizaron dos quemas sucesivas en una Mufla THERMOLYNE 30400 a 550°C por dos horas y a 925°C por cuatro horas obteniéndose a partir de la primera quema el contenido de materia orgánica y de la segunda el contenido de carbonatos (material incinerado) y siliciclastos (residuo final) (modificado de Bengtsson & Enell 1986 y Dean, 1974). Gracias a la estratigrafía de densidad de material siliciclástico fue posible identificar la correlación exacta entre los testigos y de esta manera obtener una estratigrafía maestra de sedimentos, sin hiatos entre segmentos sucesivos.

3.3 CRONOLOGÍA

Se obtuvieron muestras de sedimentos para obtener fechados radiocarbónicos a distintos niveles en los testigos de ambos lagos, las cuales se eligieron a partir de la estratigrafía maestra de los sedimentos. Estas muestras fueron enviadas al Lawrence Livermore AMS Laboratory USA, donde se determinó su edad radiocarbónica a través del método AMS (Accelerator Mass Spectrometry). La cronología interpolada de cada nivel en la columna sedimentaria se obtuvo mediante regresiones a partir de los fechados radiocarbónicos. Considerando que la producción e inventario del isótopo ^{14}C en la atmósfera no ha sido constante, se calibraron dichas edades a años calendario antes del presente (cal AP) a través del programa CALIB 5.0 para obtener una escala lineal de edades. Con el programa R (Ihaka & Gentleman, 1996) se generaron los modelos de edad con spline cúbico, el cual nos permite generar edades interpoladas a los niveles analizados mediante la aplicación de polinomios a distintos tramos de la serie, los cuales se van superponiendo secuencialmente en distintos tramos de la columna, obedeciendo a ciertas condiciones de continuidad.

3.4 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE PARTÍCULAS MACROSCÓPICAS DE CARBÓN

Con anterioridad a la presente tesis los sedimentos de Lago Campanario (Valenzuela, 2007) y Lago Reflejos (Moreno, datos no publicados) fueron procesados según el método Oregon (Millsbaugh & Whitlock 1995), tomando de forma continua y contigua 2 cc de material sedimentario a partir de cada centímetro de longitud de los testigos. Las muestras fueron disgregadas en KOH al 10% y tamizadas a través de mallas de 106 y 212 μm para separar las partículas macroscópicas de carbón (>100 μm) de los sedimentos. Las partículas de carbón se individualizaron y contaron en una lupa ZEISS KL1500 LCD.

Los resultados de los conteos de partículas de carbón fueron convertidos a concentración de carbón (partículas de carbón/cc) y luego divididos por el tiempo depositacional (años/cm), dato calculado a partir de las edades interpoladas por el modelo de edad, posibilitando el cálculo de las tasas de acumulación de carbón (partículas/cm²/año). Este parámetro permite documentar la historia local de fuego del sitio de estudio considerando explícitamente los eventuales sesgos introducidos por variaciones en las tasas de acumulación de sedimento a lo largo de la columna sedimentaria.

La serie temporal de carbón macroscópico fue analizado en el programa CharAnalysis (2004-2007 P. E. Higuera) para diferenciar el carbón background (C_{back}) de los peak de carbón (C_{peaks}) y así reconocer los eventos locales de fuego. El programa interpola a ventanas de tiempo contiguas de ancho homogéneo las tasas de acumulación de carbón, basándose para ello en la mediana de tiempo depositacional del registro, obteniéndose entonces la tasa de acumulación interpolada (CHAR, partículas/ cm²/ año). Para identificar los C_{peaks} el programa resta de la serie CHAR el C_{back} previamente suavizado por una ventana temporal definida para cada registro, obteniéndose de esta forma un valor residual, esto presume una relación aditiva entre ambos componentes. Una vez que han sido diferenciados los valores residuales se define un valor umbral para identificar C_{peaks} , dicho valor puede ser definido global o localmente en cada muestra, tomando en consideración la posible variación del C_{back} a lo largo del registro. Este criterio de umbral presupone que la distribución de los valores de C_{peak} contiene dos subpoblaciones, una población de distribución normal centrada en 0 (es decir C_{back}) reconocida como C_{noise} y otra donde los valores exceden la variabilidad, denominado C_{fire} , causado probablemente por fuegos locales. CharAnalysis utiliza un modelo Gausiano para identificar la distribución de C_{noise} , siendo considerado como el valor umbral que separa C_{fire} de C_{noise} un cierto porcentaje (95, 99 ó 99.9%) de esta distribución. Cada uno de los C_{peaks} obtenidos son evaluados antes de ser reconocidos como tales, si tienen un 5% de probabilidad de

corresponder a una misma población con distribución de Poisson son eliminados y no se consideran C_{peaks} significativos (Higuera et al. 2007, Higuera et al. 2008). Posteriormente se calcula la frecuencia de los C_{peaks} significativos a lo largo del registro según una ventana temporal definida para este estudio en 500 años.

3.5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS POLÍNICO

El registro polínico fue obtenido de manera continua-contigua a lo largo de la estratigrafía maestra de cada sitio estudiado. Muestras de 1cc de sedimento se procesaron siguiendo un protocolo estándar para análisis polínico que incluye tratamiento con KOH, HCl, HF, acetólisis (Faegri & Iversen, 1989) y la incorporación de un número conocido de esporas exóticas de *Lycopodium* (Stockmarr, 1971), luego se montaron en aceite de silicona y fueron analizadas con un microscopio óptico binocular LEICA DM LB2 con aumentos de 400x y 1000x. La identificación de los granos de polen fue realizada a través de las descripciones realizadas por Heusser (1971).

Se realizaron conteos de polen hasta completar una suma básica de 300 granos de polen terrestre (incluye árboles, arbustos y hierbas) por nivel. Los porcentajes de cada taxón terrestre fueron calculados a partir de esta suma. Los porcentajes de taxa acuáticos se calcularon a partir de la suma polen total (polen total = polen terrestre + acuáticas) y el porcentaje de helechos a partir de una súper suma (polen total + helechos). Los resultados se expresan como diagramas de porcentajes utilizando el programa Tilia (Grimm 1987).

Se caracterizaron zonas polínicas mediante la diferenciación ocular de cambios en la estratigrafía de polen y corroborado mediante el análisis CONISS (Constrained Incremental

Sum of Squares), el cual permite separar y diferenciar las distintas asociaciones presentes en el registro respetando la secuencia estratigráfica. En el análisis CONISS se utilizó el coeficiente de disimilitud Edward y Cavalli-Sforza y se consideraron sólo aquellos taxa terrestres que presentaron un porcentaje $\geq 2\%$, recalculándose las sumas y los porcentajes a posteriori.

3.6 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE PARTÍCULAS MICROSCÓPICAS DE CARBÓN

Todas las partículas de carbón menores a 100 μm de diámetro presentes en las preparaciones microscópicas de polen fueron contabilizadas, con la finalidad de obtener el registro de paleofuegos regionales o extralocales. Se utilizó los conteos de esporas exóticas de *Lycopodium* (Stockmarr, 1971) provenientes de cada nivel para obtener la concentración de partículas microscópicas de carbón y posibilitar el cálculo de la Tasa de Acumulación (TA = partículas/ $\text{cm}^2/\text{año}$) y así realizar la comparación entre reconstrucciones de historias de fuego a partir de partículas macroscópicas y microscópicas de carbón.

4. RESULTADOS

4.1 LAGO CAMPANARIO

4.1.1 REGISTRO SEDIMENTARIO

La estratigrafía maestra de Lago Campanario que se reporta en esta tesis incluye material proveniente de tres testigos: 0401SC, 0401AT1 y 0402AT2. Los sedimentos consisten principalmente en Gyttja (barro orgánico lacustre) con presencia de limos (Figura 3). Se observan 6 niveles clásticos en la zona más basal del registro que se consideran como tefras de variada granulometría.

4.1.2 GEOCRONOLOGÍA

La cronología del registro de Lago Campanario se sustenta sobre siete fechados radiocarbónicos (Tabla 2) y la asignación de la edad -54 años AP al techo del registro. Bajo la suposición que los niveles considerados como tefras se depositaron de manera instantánea y con el fin de desarrollar un modelo de edad correcto que incorpore explícitamente los distintos regímenes de depositación, se sustrajo el espesor de las tefras presentes en la columna de sedimentos, comprimiéndolas numéricamente al espesor mínimo de análisis correspondiente a un ancho inferior a 1 centímetro.

El modelo de edad se obtuvo a través de un spline de 0.1 (Figura 4) y abarca un tramo temporal de aproximadamente 3400 años, con una media de 14 años/cm de tiempo depositacional. Las tefras fueron acotadas cronológicamente por fechados radiocarbónicos (Figura 3). Se destaca la presencia de una tefra de gran espesor (entre 192-202 cm), con una edad máxima cercana de 2465 ± 70 años ^{14}C AP (2400 años cal AP).

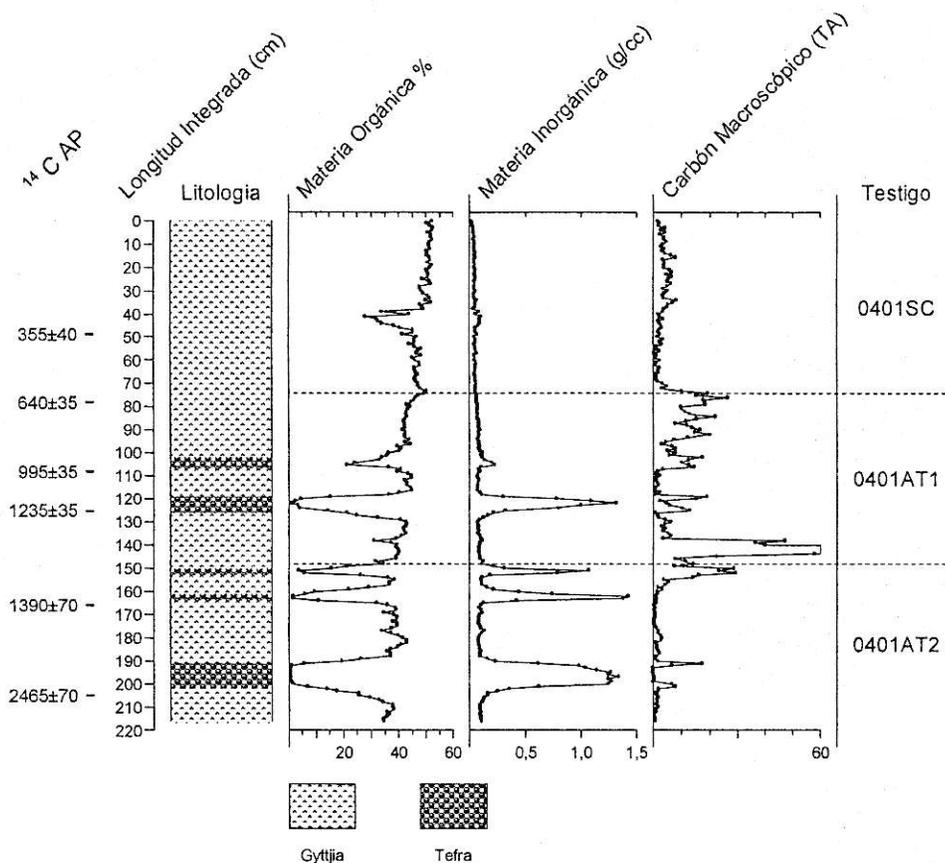


Figura 3. Columna estratigráfica maestra de Lago Campanario y parámetros del análisis de pérdida por ignición (PPI). Se muestra la posición de los fechados radiocarbónicos obtenidos por AMS, correspondencia de longitud con cada testigo analizado, litología y tasa de acumulación (TA) de partículas macroscópicas de carbón (Valenzuela 2007). El eje X de la TA fue truncado, el valor máximo de la TA corresponde a 12,5 (partículas/cm²/año).

Código de la datación	Testigo	Longitud (cm)	Años ¹⁴ C AP ± 1 σ	Años cal AP*
CAMS- 124604	0401SC	49	355±40	390
CAMS-124605	0401AT1	78	640±35	604
CAMS-124603	0401AT1	108	995±35	852
CAMS-125919	0401AT1	125	1235±35	1103
CAMS-128963	0401AT2	166	1390±70	1267
CAMS-128984	0401AT2	215	2465±70	2444
CAMS-128985	0401AT2	230	3315±70	3481

Tabla 2: Dataciones radiocarbónicas realizadas en el registro sedimentario de Lago Campanario. La longitud corresponde a valores de la estratigrafía maestra. (*Mediana de probabilidad).

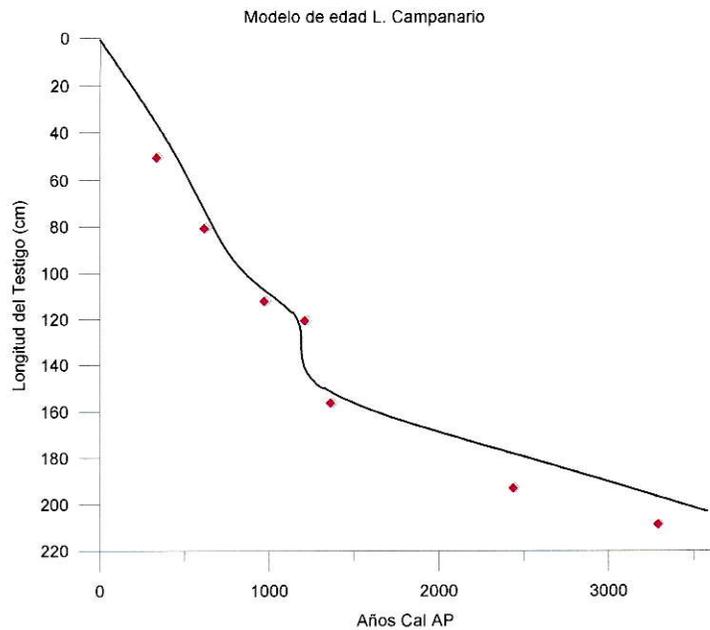


Figura 4: Modelo de edad del registro de Lago Campanario. El modelo se generó utilizando el programa R con un spline de 0.1. Los fechados (◇) corresponden a años ^{14}C AP (tabla 2), el modelo de edad se presenta años calendario antes del presente (Cal AP).

4.1.3 ANÁLISIS POLÍNICO DE LAGO CAMPANARIO

El registro de polen Lago Campanario (LC) se realizó a lo largo de la estratigrafía maestra analizándose un total de 188 niveles. Considerando los cambios presentes en la estratigrafía polínica, especies indicadoras y un ordenamiento CONISS se identifican 5 zonas polínicas (Tabla 3). Las Figuras 5, 6 y 7 muestran el diagrama de porcentaje de polen. Las principales características de las distintas zonas se describen a continuación. En cada zona se especifican los ensambles dominantes, estos corresponden a los 3 taxa con los más altos porcentajes a lo largo de la zona polínica.

ZONAS POLÍNICAS DE LAGO CAMPANARIO:

Zona LC1 (197-152 cm, 3200-1360 años cal AP). *Nothofagus* tipo *dombeyi*–*Hydrangea*–*Eucryphia*/*Caldcluvia*. Otros elementos importantes son *Weinmannia trichosperma*, *Saxegothaea conspicua* y tipo *Blechnum*. Porcentajes cercanos al 4% se observan en *Aextoxicon punctatum*, *Escallonia*, *Myrtaceae*, *Lomatia/Gevuina*, y tipo *Pteris*. Frecuentes peak en los diferentes taxa ilustran alta variabilidad en esta zona. Se observa una expansión en *N.* tipo *dombeyi* hacia el techo de la zona llegando a 50%. La hemiparásita *Misodendron* presenta una expansión importante desde la mitad de la zona hacia el techo, situación opuesta se observa en *A. punctatum*. *Fitzroya/Pilgerodendron* muestra una tendencia de disminución, *S. conspicua*, *W. trichosperma*, *Eucryphia/Caldcluvia*, *Myrtaceae* e *Hydrangea* se mantienen relativamente constantes en el transcurso de la zona. Existen dos tefras, una en la base y otra en la parte media de LC1.

Zona LC2 (152-92 cm, 1360–770 años cal AP). *Nothofagus* tipo *dombeyi*–*Eucryphia*/*Caldcluvia*–*Hydrangea*. *N.* tipo *dombeyi* experimenta un notable y sostenido descenso desde ~50% a 16%, mientras que *Eucryphia/Caldcluvia*, *Tepualia stipularis*, *Escallonia*, *Poaceae* e *Hydrangea* exhiben incrementos al inicio de la zona para permanecer relativamente constantes en el transcurso de ella. *Fitzroya/Pilgerodendron* revierte la tendencia de disminución pero exhibe alta variabilidad. *S. conspicua* presenta un leve incremento, tipo *Blechnum* y *Polypodium feuilleu* llega a valores máximos hacia el techo. Durante esta zona se registran cuatro tefras, dos de ellas en el sector basal y las otras cercanas al techo.

Zona LC3 (92-62 cm, 770–580 años cal AP). *Nothofagus* tipo *dombeyi*–Poaceae–*Eucryphia/Caldcluvia*. El mayor cambio lo constituye el rápido incremento de *N.* tipo *dombeyi* que alcanza valores de 60% a la par con un incremento en *Misodendron*. *Fitzroya/Pilgerodendron* expande hasta la parte media de la zona para luego disminuir hacia el techo. Son apreciables descensos en *Eucryphia/Caldcluvia*, *Hydrangea*, Myrtaceae, *Escallonia*, *Lomatia/Gevuina*. *T. stipularis* y *A. punctatum* llegan a sus valores mínimos para el registro. *S. conspicua* y *P. nubigena* permanecen constantes y tipo *Blechnum* disminuye a la mitad su porcentaje. No se observa depositación de tefras desde esta zona hasta el presente.

Zona LC4 (62-38 cm, 580–350 años cal AP). *Nothofagus* tipo *dombeyi*–*Hydrangea*–*Eucryphia/Caldcluvia*. Durante esta zona se registra un nuevo descenso abrupto en *N.* tipo *dombeyi*, expansión de *Eucryphia/Caldcluvia* e *Hydrangea*. En esta zona *Misodendron* presenta valores máximos, mientras que *Fitzroya/Pilgerodendron*, *Escallonia* y *Lomatia/Gevuina* llegan a valores mínimos. *W. trichosperma*, *S. conspicua*, Myrtaceae, Poaceae y tipo *Blechnum* se mantienen constantes.

Zona LC5 (38-0 cm, 350–0 años cal AP). *Nothofagus* tipo *dombeyi*–*Hydrangea*–Poaceae. La principal característica de esta zona es la aparición y expansión de Asteraceae-Liguliflorae, *Plantago* y *Rumex*, junto con un abrupto incremento de Poaceae. *N.* tipo *dombeyi* se mantiene constante al igual que *S. conspicua*, *W. trichosperma*, *Eucryphia/Caldcluvia* y tipo *Blechnum*. Una pequeña expansión de *Misodendron*, *Aextoxicon punctatum* y *Drimys* se observa en los niveles finales mientras que *Hydrangea* y *Polipodium feullei* presentan una leve tendencia de disminución.

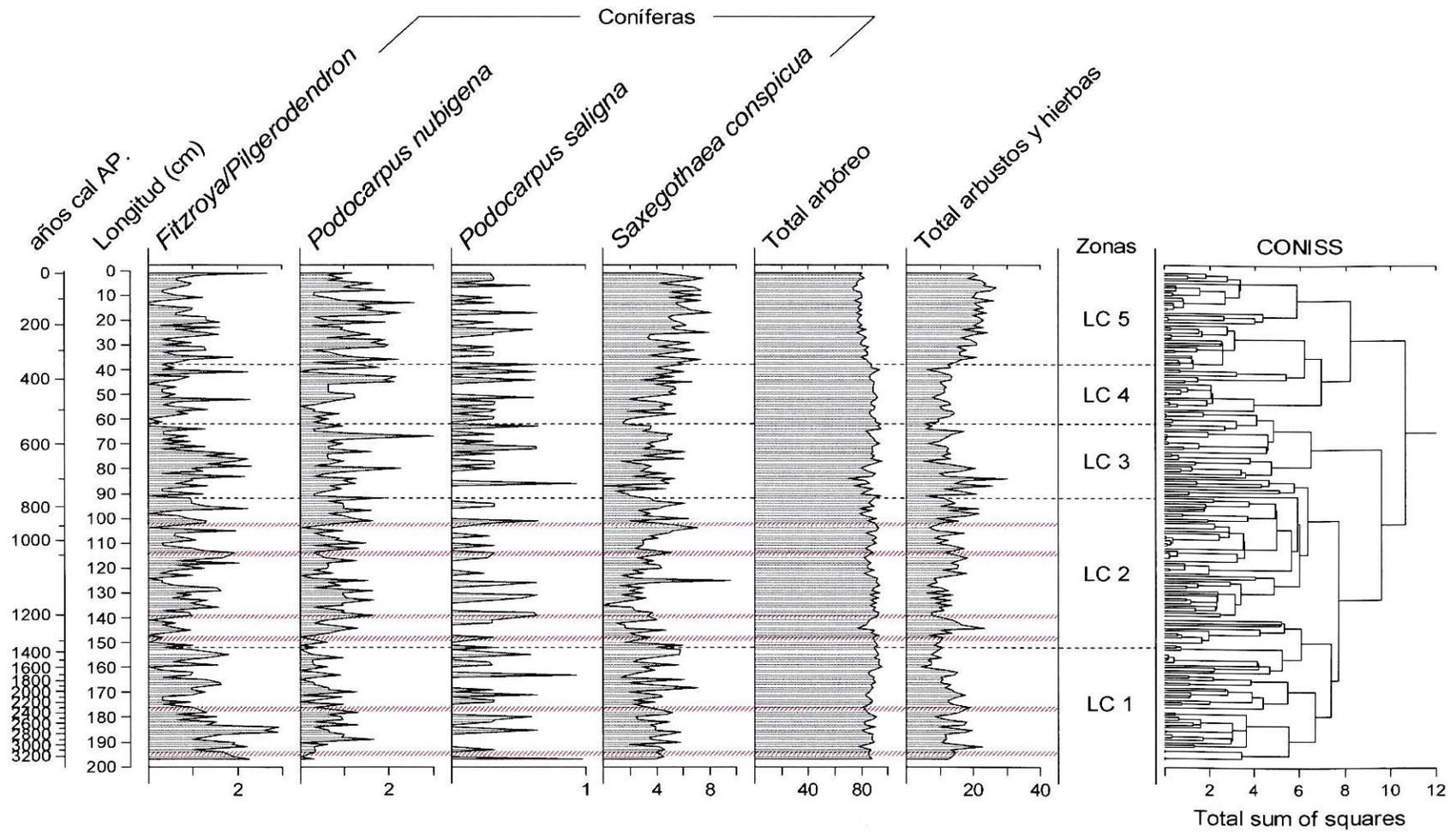


Figura 5. Diagrama de porcentajes de polen de coníferas de Lago Campanario. El eje y primario corresponde a la longitud con las tefras comprimidas a 1cm de espesor. El eje y secundario muestra el modelo de edad en años cal AP, se muestran además las divisiones de las zonas polínicas y el dendrograma CONISS. Las zonas achuradas representan las tefras presentes en el registro.

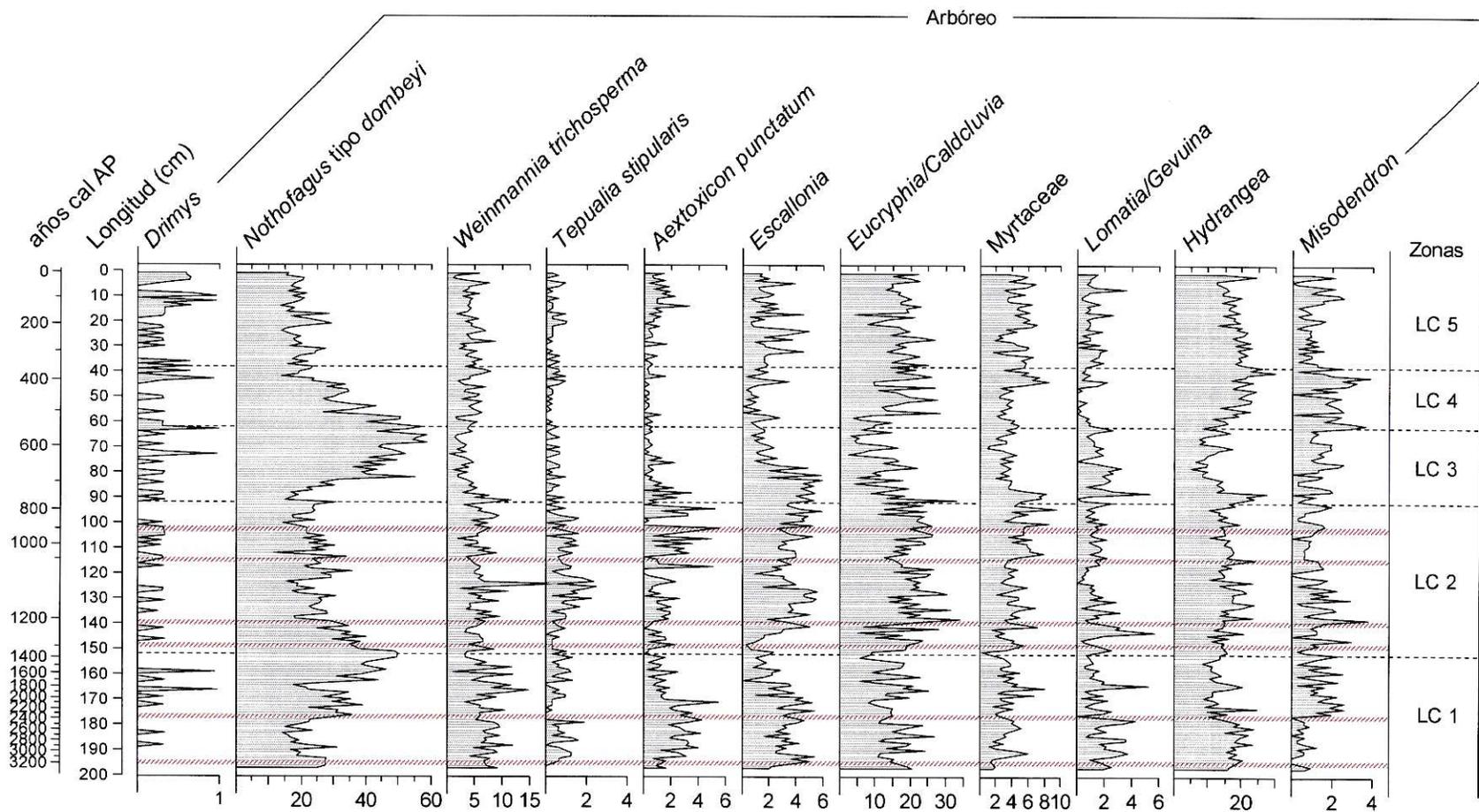


Figura 6. Diagrama de porcentaje de polen arbóreo de Lago Campanario. Se observa el modelo de edad en años calendarios antes del presente y las divisiones de las zonas polínicas. El eje y primario corresponde a la longitud con las tefras comprimidas. Las zonas achuradas corresponden a posición de las tefras en la columna sedimentaria

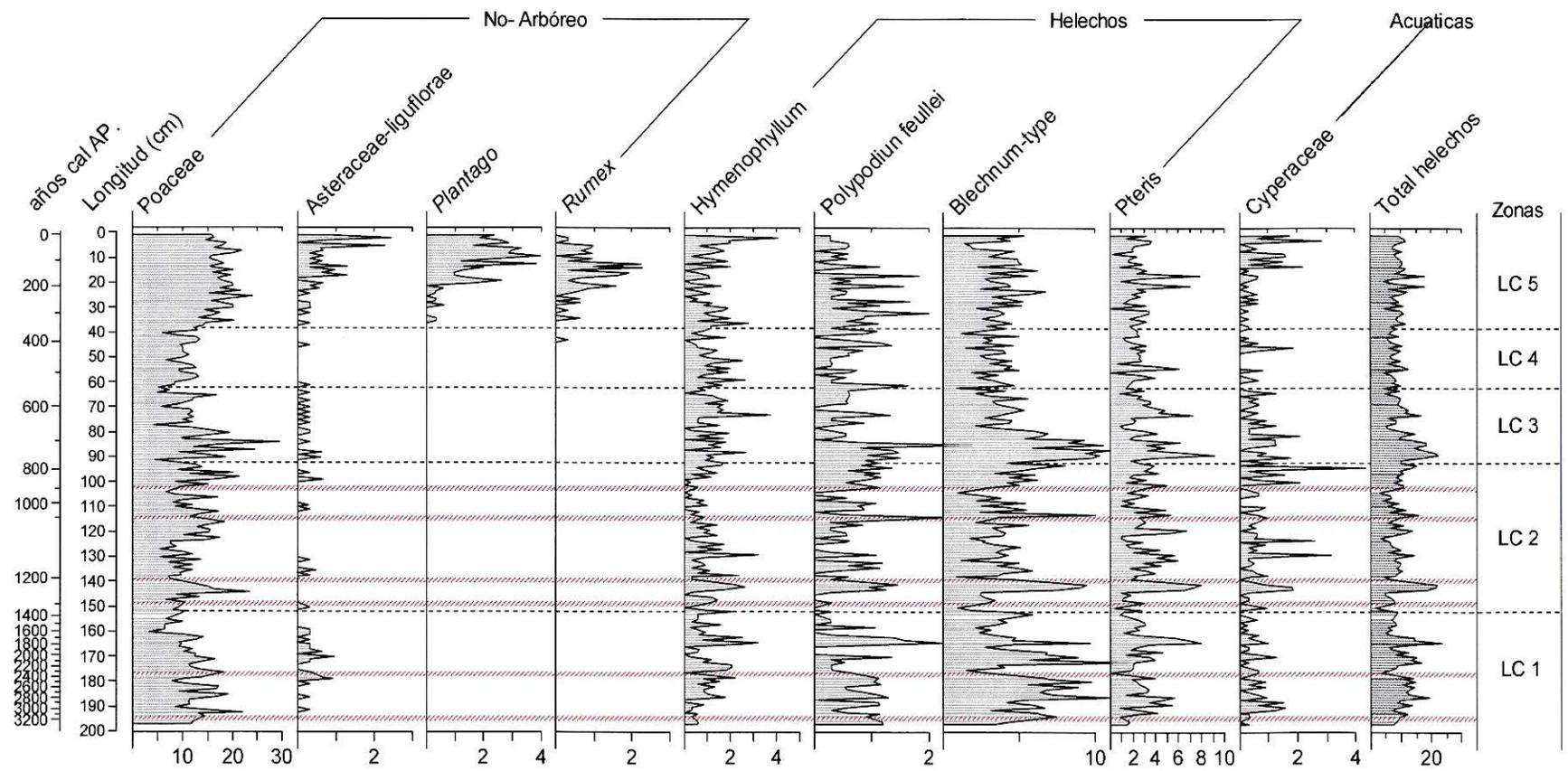


Figura 7. Diagrama de porcentaje de polen no arbóreo de Lago Campanario. Se observa el modelo de edad en años calendarios antes del presente y las divisiones de las zonas polínicas. Las zonas achuradas corresponden a la posición de las tefras en la columna sedimentaria.

Zona	longitud (cm)	Años cal AP	Ensamble dominante
LC5	38-0	350 – 0	<i>N. tipo dombeyi</i> , <i>Hydrangea</i> , <i>Poaceae</i>
LC4	62-38	580 – 350	<i>N. tipo dombeyi</i> , <i>Hydrangea</i> , <i>Eucryphia/Caldcluvia</i>
LC3	62-92	770 – 580	<i>N. tipo dombeyi</i> , <i>Poaceae</i> , <i>Eucryphia/Caldcluvia</i>
LC2	152-92	1360-770	<i>N. tipo dombeyi</i> , <i>Eucryphia/Caldcluvia</i> , <i>Hydrangea</i>
LC1	197-152	3200-1360	<i>N. tipo dombeyi</i> , <i>Hydrangea</i> , <i>Eucryphia/Caldcluvia</i>

Tabla 3. Resumen de ensamblajes dominantes en las zonas polínicas de Lago Campanario. La longitud corresponde a la estratigrafía maestra. Las edades corresponden a años calendario antes del presente interpolados por el modelo de edad

4.1.4 ANÁLISIS DE PARTÍCULAS MICROSCÓPICAS DE CARBÓN

La Figura 8 muestra la tasa de acumulación (partículas/cm²/años) de partículas microscópicas de carbón de Lago Campanario obtenido a partir de las preparaciones palinológicas. Este registro se compara con el registro de partículas macroscópicas representante de fuegos locales (Valenzuela, 2007).

El registro de partículas de carbón de Lago Campanario presenta una notable similitud entre las partículas macroscópicas observadas en muestras de sedimentos y las partículas de carbón microscópico contabilizadas en las muestras de polen. Ambas fuentes de información muestran escasa actividad de fuego durante los primeros 1500 años del registro (zona polínica LC1), para luego aumentar a sus valores máximos (4000 partículas/cm² /año para microscópico y 1500 partículas/cm² /año para macroscópico). Las mayores tasas de acumulación de partículas ocurren a los 1200±100 años cal AP (inicio zona LC2) para luego descender abruptamente hasta sus valores mínimos a los 1000 años cal AP. Se observa un segundo pulso de actividad de fuego a partir de 900 hasta 650 años cal AP (final LC 2 y zona LC 3), para luego permanecer con baja actividad de fuego hasta ~350 años cal AP (zona LC4), a continuación se observa un

leve aumento de la tasa de acumulación que permanece relativamente constante hasta el presente (zona LC5). El análisis del registro de partículas de carbón de Lago Campanario a través de la TA no muestra asociación directa entre aumento de la actividad de fuego y deposición de tefras (zonas LC1 y LC2, Figura 8).

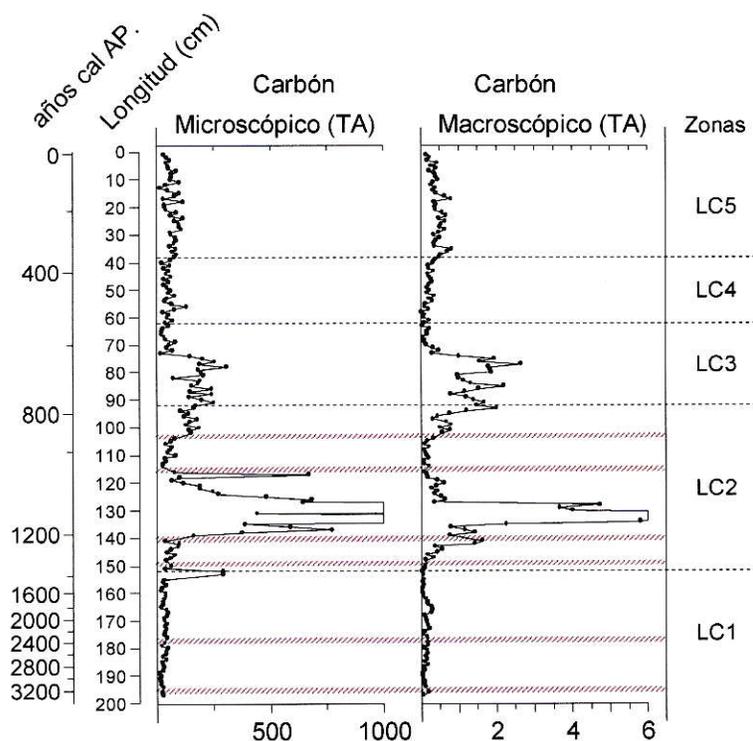


Figura 8. Tasas de acumulación de partículas microscópicas y macroscópicas de carbón de Lago Campanario (TA = partículas/cm²/año). Las líneas achuradas corresponden a tefras presentes en la columna sedimentaria. Se presenta la correspondencia con las zonas polínicas descritas anteriormente, y el modelo de edad en años calendarios antes del presente (años cal AP). El eje X fue truncado para ampliar la visualización de la variabilidad (carbón microscópico llega a un máximo de 4000 partículas/cm²/año y carbón macroscópico a un máximo de 1500 partículas/cm²/año)

4.1.5 ANÁLISIS DE PARTÍCULAS MACROSCÓPICAS DE CARBÓN

Analizamos la serie temporal del registro de partículas macroscópicas de carbón a través del programa CharAnalysis, los resultados se muestran en la Figura 9. Se interpoló a intervalos homogéneamente espaciados el registro a través de una mediana del tiempo depositacional de 9 años, se utilizó una ventana temporal de 500 años para suavizar la serie a través de un filtro lowess robusto a outliers y obtener el background (C_{back}), un valor umbral de 0.99 para la diferenciación de peak (C_{peak}) y 500 años para calcular la frecuencia de C_{peak} . Junto con el análisis del registro de carbón se evaluó el registro de densidad seca inorgánica obtenido del análisis de pérdida por ignición el cual representa los niveles clásticos de los sedimentos y por lo tanto las tefras presentes en la columna sedimentaria, esto nos permite documentar bajo un mismo tratamiento numérico y consideraciones las posibles asociaciones entre eventos de fuego y de actividad volcánica.

El análisis de carbón macroscópico y de densidad seca de materia inorgánica a través de CharAnalysis nos permite observar las relaciones estratigráficas entre paleofuegos y depositación de niveles clásticos. Existe una marcada diferencia entre la tasa de acumulación de carbón entre 3200-1800 años cal AP y durante los últimos 1800 años donde se puede observar un aumento significativo en la depositación de partículas. En el tramo temporal 3300-1800 años cal AP se observa baja actividad de fuego con 6 C_{peak} significativos y 2 no-significativos (Figura 9). Una tefra con una edad interpolada de 3300 años cal AP se asocia con dos C_{peak} de fuego significativos y uno no significativo posteriores a su depositación. Una segunda tefra con edad de 2400 años cal AP no presenta asociación estratigráfica con ningún evento de fuego reconocido en el análisis como C_{peak} .

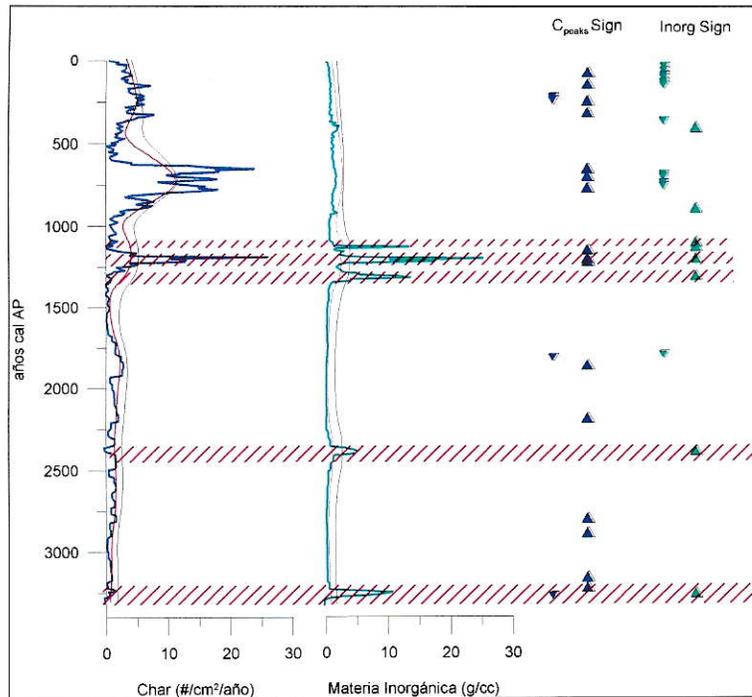


Figura 9: Análisis de la serie temporal de tasas de acumulación de partículas macroscópicas de carbón y densidad de materia inorgánica de Lago Campanario a través del programa CharAnalysis. La curva roja corresponde al Background (C_{back}) y la curva negra al valor umbral. Los C_{peak} de carbón significativo (▲) representan a los eventos locales de fuego. Las tefras de la columna sedimentaria definidas a través de PPI y de la litología del registro se marcan con una zona achurada. Se observan peak de niveles clástico significativos (▲) y no significativos (▼).

Se reconocen eventos locales de fuego datados en ~2200 y 1900 años cal AP, existiendo un aumento de densidad seca de materia inorgánica en los sedimentos posterior a 1900 años cal AP (Inorg sig). Un aumento en la TA es observado en ~1200 años cal AP el cual está asociado a la depositación de 4 niveles clásticos 3 de los cuales corresponden a tefras. Una última tefra con edad interpolada de 900 años cal AP precede a la ocurrencia de un aumento en la TA, el que cuenta con tres C_{peak} significativos y 4 niveles clásticos no significativos. Un último pulso de actividad de fuego es observado entre 0 y 400 años cal AP, el cual esta precedido de un nivel clástico significativo no considerado como tefra, asociado a eventos de fuego locales (4 C_{peak}) y a un aumento de densidad de materia inorgánica en los sedimentos representada como C_{peak} de materia inorgánica no significativos.

Existe una baja acumulación de partículas de carbón y diferencias significativas en la tasa de depositación a lo largo del registro de L. Campanario, el cual tiene 9 años/cm en promedio entre 0-150 cm de longitud y 40 años/cm entre 150-197 cm longitud, generando una baja resolución en el tramo más basal y por lo tanto un aumento significativo en el ruido de la serie temporal. Considerando estas diferencias se restringió el análisis de CharAnalysis a los últimos 2000 años del registro L. Campanario, lo cual nos permite maximizar la señal en el tramo de mayor resolución temporal y actividad de fuego.

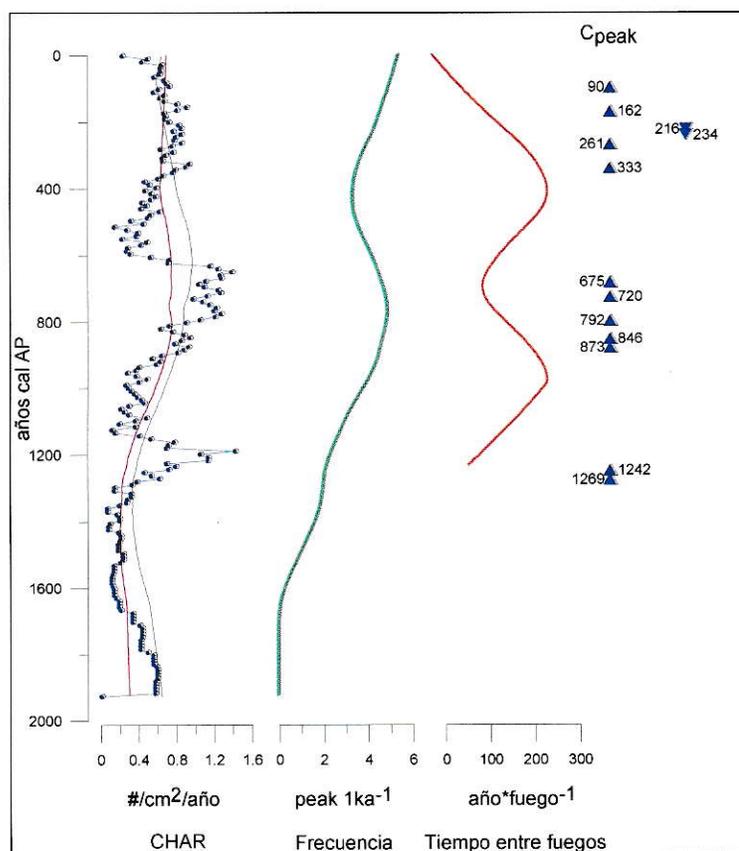


Figura 10: Análisis de la Tasa de acumulación de carbón macroscópico de Lago Campanario a través de CharAnalysis. El gráfico corresponde tasa de acumulación (CHAR), Frecuencia de eventos de fuego cada 500 años y el Tiempo entre eventos de fuego. La curva roja corresponde al background (C_{back}) y la curva negra al valor umbral. Se presentan las edades inferidas de cada C_{peak} significativo (▲) y no significativo (▼) El eje y corresponde al modelo de edad en años calendarios antes del presente.

El CharAnalysis de L. Campanario (Figura 10) muestra 4 momentos con aumento de actividad de fuego (CHAR), el primero entre 1900-1800 años cal antes del presente, que no genera ningún C_{peak} significativo. Un segundo aumento en actividad de fuego se observa a partir de 1400 años cal AP, este tramo temporal genera dos C_{peak} fechados en 1269 y 1242 años cal AP, luego se observa una caída rápida y de corta duración en la tasa de acumulación. Un tercer periodo de aumento de actividad de fuego se inicia a partir de ~1100 años cal AP, el cual genera 5 C_{peak} (entre 675 y 873 años cal AP). Aumento en la actividad se observa desde 400 años cal AP, este aumento de actividad de fuego genera 6 C_{peak} de los cuales 2 corresponden a no significativos (234 y 216 años cal AP). Los 4 C_{peak} restantes están acotados entre 333 y 90 años cal AP. Un aumento en la frecuencia de C_{peak} se observa entre 1700 y 800 años cal AP, otro aumento en la frecuencia se observa durante los últimos 400 años, a su vez, una disminución de frecuencia es observada entre 800 y 400 años cal AP.

4.2 LAGO REFLEJOS

4.2.1 REGISTRO SEDIMENTARIO

La columna sedimentaria de Lago Reflejos analizada tiene una longitud acumulada de 163 cm, provenientes de los testigos Reflejos SC y 0402AT1, 0402BT1, extraídos de la zona central y más profunda del lago. La estratigrafía maestra consiste en una matriz de Gittja (barro orgánico lacustre) con presencia de laminaciones inorgánicas tenues y 5 niveles clásticos que, para efectos de esta tesis, son considerados niveles piroclásticos de caída y que fueron acotados cronológicamente a través de fechados radiocarbónicos (Figura 11).

4.2.2 GEOCRONOLOGÍA

La geocronología del registro obtenido en Lago Reflejos se basa en ocho fechados (tabla 4) radiocarbónicos que abarcan los últimos 3200 años, con una tasa de depositación media de 15 años/cm. El modelo de edad se obtuvo a través de un spline de 0.25 (Figura 12). Se sustrajo el espesor de las tefras presentes en la columna de sedimentos, comprimiéndolas numéricamente al interior de 1 centímetro, considerando que su depositación ocurre de manera instantánea. Se observa en la estratigrafía de Lago Reflejos la depositación de 5 niveles clásticos diferenciados como tefras, la tefra que presenta mayor espesor está acotada cronológicamente entre dataciones con edades de 1600 y 2400 años cal AP (Figura 12).

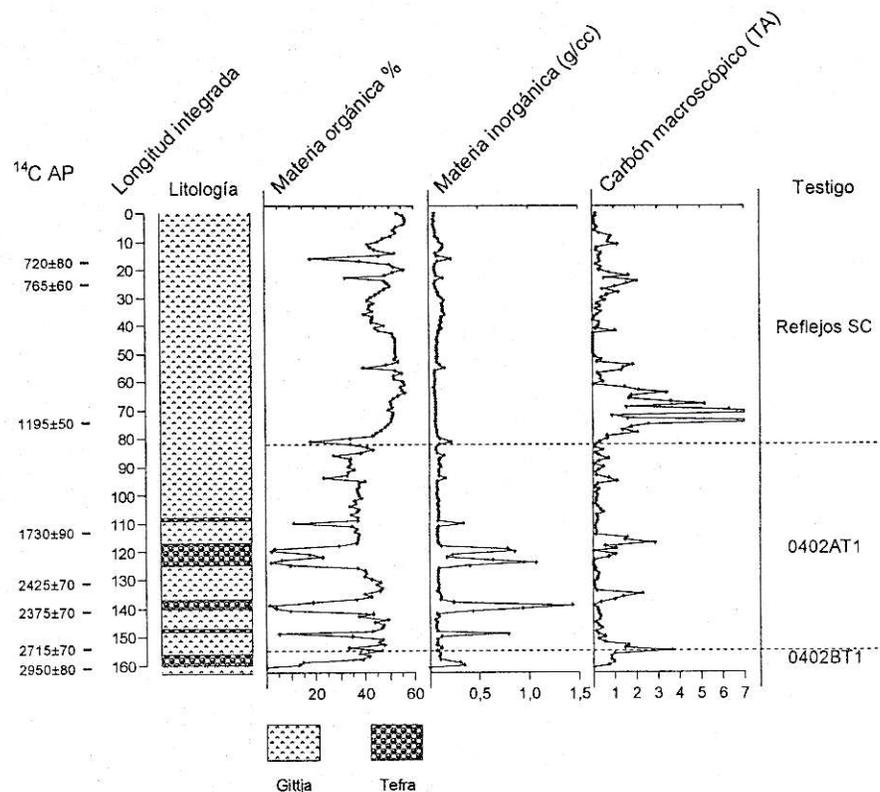


Figura 11. Columna estratigráfica maestra de Lago Reflejos. Se presentan los valores de materia orgánica y densidad seca inorgánica provenientes del análisis de Pérdida por Ignición (PPI), litología, correspondencia de longitud con cada testigo analizado y Tasa de Acumulación (TA = partículas/ cm² / año) de partículas macroscópicas de carbón. Además se observan los niveles con dataciones radiocarbónicas AMS.

Código de la datación	Testigo	Longitud (cm)	Años ^{14}C AP $\pm 1\sigma$	Años cal AP*
CAMS-124566	0402BSC	17	720 \pm 80	627
CAMS-124567	0402BSC	25	765 \pm 60	666
CAMS-124569	0402AT1	74	1195 \pm 50	1027
CAMS-117110	0402BT1	113	1730 \pm 90	1581
CAMS-115812	0402AT1	131	2425 \pm 70	2409
CAMS-115813	0402AT1	141	2375 \pm 70	2337
CAMS-117111	0402BT1	154	2715 \pm 70	2772
CAMS-117112	0402BT1	161	2950 \pm 80	3031

Tabla 4: Dataciones radiocarbónicas realizadas en el registro sedimentario de Lago Reflejos. Los valores de longitud corresponden a la estratigrafía maestra, AP = años antes del presente. * mediana de probabilidad.

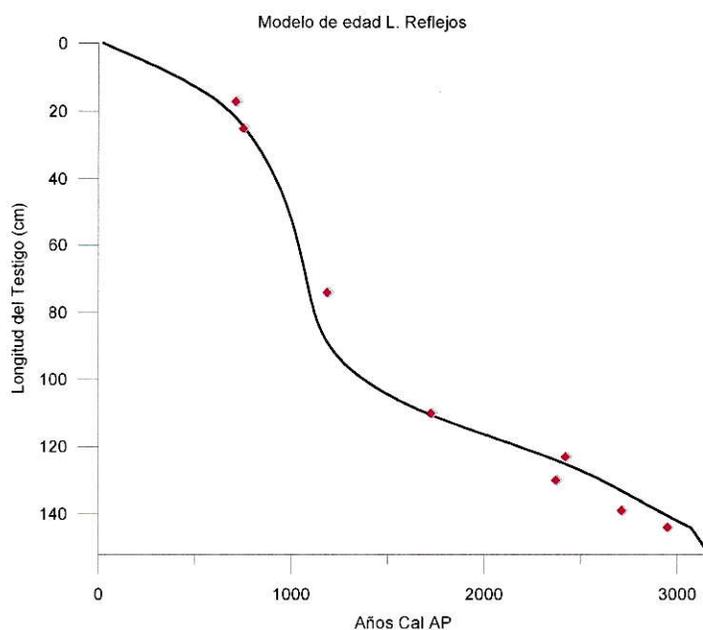


Figura 12: Modelo de edad del registro sedimentario de Lago Reflejos. El modelo se generó utilizando el programa R con un spline de 0.25. Los fechados (\diamond) corresponden a Años ^{14}C AP (tabla 4), mientras que el modelo de edad corresponde años calendarios antes del presente (Cal AP).

4.2.3 ANÁLISIS POLÍNICO DEL REGISTRO OBTENIDO EN LAGO REFLEJOS

El registro de polen fósil se realizó en forma continua a lo largo de la columna sedimentaria, analizándose un total de 145 niveles.

El registro polínico de Lago Reflejos (LR) está dominado durante los últimos 3000 años por un ensamble compuesto por *Nothofagus* tipo *dombeyi* ($\bar{X} = 52\%$) y Poaceae ($\bar{X} = 15\%$). A lo largo del registro estas taxa sólo presentan variaciones en sus porcentajes, correspondiendo siempre a los dominantes, seguidos por *Fitzroya/Pilgerodendron* ($\bar{X} = 8\%$) y *Saxegothaea conspicua* ($\bar{X} = 7\%$).

Debido a esta constancia en el registro y con la finalidad de definir y diferenciar zonas polínicas se utilizó la secuencia jerárquica de taxa cuyas abundancias fueran las mayores a continuación de los taxa dominantes anteriormente mencionados. De esta manera y a través de criterios estratigráficos, especies indicadoras y ordenación CONISS se identificaron 6 zonas polínicas todas ellas dominadas por el ensamble principal compuesto por *N.* tipo *dombeyi*-Poaceae y diferenciada a través de sus co-dominantes secundarios, las cuales se describen a continuación.

ZONAS POLÍNICAS DEL REGISTRO DE LAGO REFLEJOS

Zona LR1 (150-127 cm, 3130-2460 años cal AP). Ensamble *Fitzroya/Pilgerodendron*-*S.conspicua*-*Eucryphia/Caldcluvia*-*Podocarpus nubigena*. Otros taxa importantes en esta zona son *Weinmannia trichosperma*, tipo *Blechnum* e *Isoetes savatieri*. Porcentajes menores alcanzan *Drimys*, Myrtaceae, *Misodendron* y Cyperaceae. En el transcurso de esta zona Poaceae y *P. nubigena* muestran una tendencia de aumento hacia el techo, *N.* tipo *dombeyi*,

Fitzroya/Pilgerodendron y *W. trichosperma* permanecen relativamente constante, los taxa restantes muestran alta variabilidad. Esta zona comienza y termina con niveles pirocláticos, además se registran otras dos tefras en su porción media (Figura 11).

Zona LR2 (127-100 cm, 2460-1360 años cal AP). Ensamble *Fitzroya/Pilgerodendron*-*S. conspicua*-*Weinmannia trichosperma*-*P. nubigena*. *N. tipo dombeyi* presenta un leve aumento a lo largo de la zona, *Fitzroya/Pilgerodendron* desciende bruscamente al inicio para recuperarse hacia el techo, *S. conspicua* presentan fuertes fluctuaciones, *W. trichosperma* *Hydrangea* y *Eucryphia/Caldcluvia* muestran máximos de corta duración para disminuir hacia el límite superior de la zona. Poaceae presenta un pulso de expansión al inicio de la zona, para disminuir levemente y mantenerse constante durante ella, *I. savatieri* incrementa hasta llegar a un máximo y disminuye abruptamente a continuación. Esta zona presenta la depositación de dos niveles clásticos en su parte media.

Zona LR3 (100-61cm, 1360-1040 años cal AP). Ensamble *Fitzroya/Pilgerodendron*-*S. conspicua*-*W. trichosperma*-*Eucryphia/Caldcluvia*. *N. tipo dombeyi* y Poaceae muestran escasa variabilidad y una leve tendencia al incremento, mientras que *S. conspicua* presenta muchas fluctuaciones de gran amplitud al igual que en LR2. *Fitzroya/Pilgerodendron* disminuye en un 5% en el transcurso de la zona, *W. trichosperma* y *Eucryphia/Caldcluvia* continúan con una leve disminución iniciada en la zona previa, mientras que Myrtaceae expande mostrando valores máximos en el techo. *P. nubigena*, *P. saligna*, *Drimys*, e *I. savatieri* se mantienen relativamente constantes. En relación a los helechos, tipo *Blechnum* inicia una leve tendencia de expansión.

Zona LR4 (61-41 cm, 1040-920 años cal AP). Ensamble *S. conspicua*-*Fitzroya/Pilgerodendron*-*P. nubigena*-*W. trichosperma*. *N. tipo dombeyi* alcanza su máxima abundancia del registro y permanece en un plateau de 60% con escasa variación. Un comportamiento similar es evidente

en Poaceae. *S. conspicua* y *Fitzroya/Pilgerodendron*, los cuales presentan una notoria y sostenida disminución hasta llegar a su mínima abundancia en el registro. Otros taxa que presentan disminuciones en sus abundancias son *Eucryphia/Caldcluvia*, *W. trichosperma*, *Misodendron* y *A. punctatum*. *I. savatieri* desaparece temporalmente durante esta zona. *Drimys* expande llegando a valores máximos para el registro. Tipo *Blechnum* continúa expandiendo y se observan leves aumentos en el porcentaje de *P. nubigena* e Hymenophyllaceae.

Zona LR5 (41-20 cm, 920-660 años cal AP). Ensamble *S. conspicua*-*P. nubigena*-*Fitzroya/Pilgerodendron*-*W. trichosperma*. Se destaca una disminución en *N. tipo dombeyi* y *Drimys*. Las coníferas *S. conspicua* y *Fitzroya/Pilgerodendron* junto con *W. trichosperma* y *Eucryphia/Caldcluvia* incrementan, revirtiendo la tendencia observada en la zona anterior. Expanden levemente Cyperaceae y reaparece *I. savatieri*, mientras que Tipo *Blechnum* presenta una notoria disminución.

Zona LR6 (20-1 cm, 660-0 años cal AP) Ensamble *S. conspicua*-*Fitzroya/Pilgerodendron*-*P. nubigena* *W. trichosperma*. Esta zona es definida principalmente por la aparición y expansión de *Rumex* y *Plantago*, al inicio de ella se observa aumento en *N. tipo dombeyi*, *P. nubigena*, Myrtaceae y tipo *Blechnum*, tendencia que es revertida a lo largo de la zona. Existen aumentos leves en Poaceae, *Drimys*, *Fitzroya/Pilgerodendron*, *I. savatieri*, *Tepualia stipularis*, *Lomatia/Gevuina* y *Misodendron*.

La tabla 5 resume las zonas polínicas del registro de Lago Reflejos. Las Figuras 13, 14 y 15 muestran la variación porcentual de los distintos taxa en el registro polínico.

Zona	Longitud (cm)	Años cal AP	Ensamble dominante
LR6	20-1	660-0	<i>S. conspicua</i> – <i>Fitzroya/Pilgerodendron</i> – <i>P. nubigena</i> – <i>W. trichosperma</i> .
LR5	41-20	920-660	<i>S. conspicua</i> – <i>P. nubigena</i> – <i>Fitzroya/Pilgerodendron</i> – <i>W. trichosperma</i> .
LR4	61–41	1040-920	<i>S.conspicua</i> – <i>Fitzroya/Pilgerodendron</i> – <i>P. nubigena</i> – <i>W. trichosperma</i> .
LR3	100 -61	1360-1040	<i>Fitzroya/Pilgerodendron</i> – <i>S. conspicua</i> – <i>W. trichosperma</i> – <i>Eucryphia/Caldcluvia</i> .
LR2	127-100	2460-1360	<i>Fitzroya/Pilgerodendron</i> – <i>S. conspicua</i> – <i>Weinmannia trichosperma</i> – <i>P. nubigena</i>
LR1	150-127	3130-2460	<i>Fitzroya/Pilgerodendron</i> – <i>S.conspicua</i> – <i>Eucryphia/Caldcluvia</i> – <i>P. nubigena</i> .

Tabla 5. Resumen de las zonas polínicas de Lago Reflejos con el listado de taxa co-dominantes cuyas abundancias son las más altas a continuación de *N. tipo dombeyi* y Poaceae. Las edades corresponden al rango temporal de cada zona, en años cal AP.

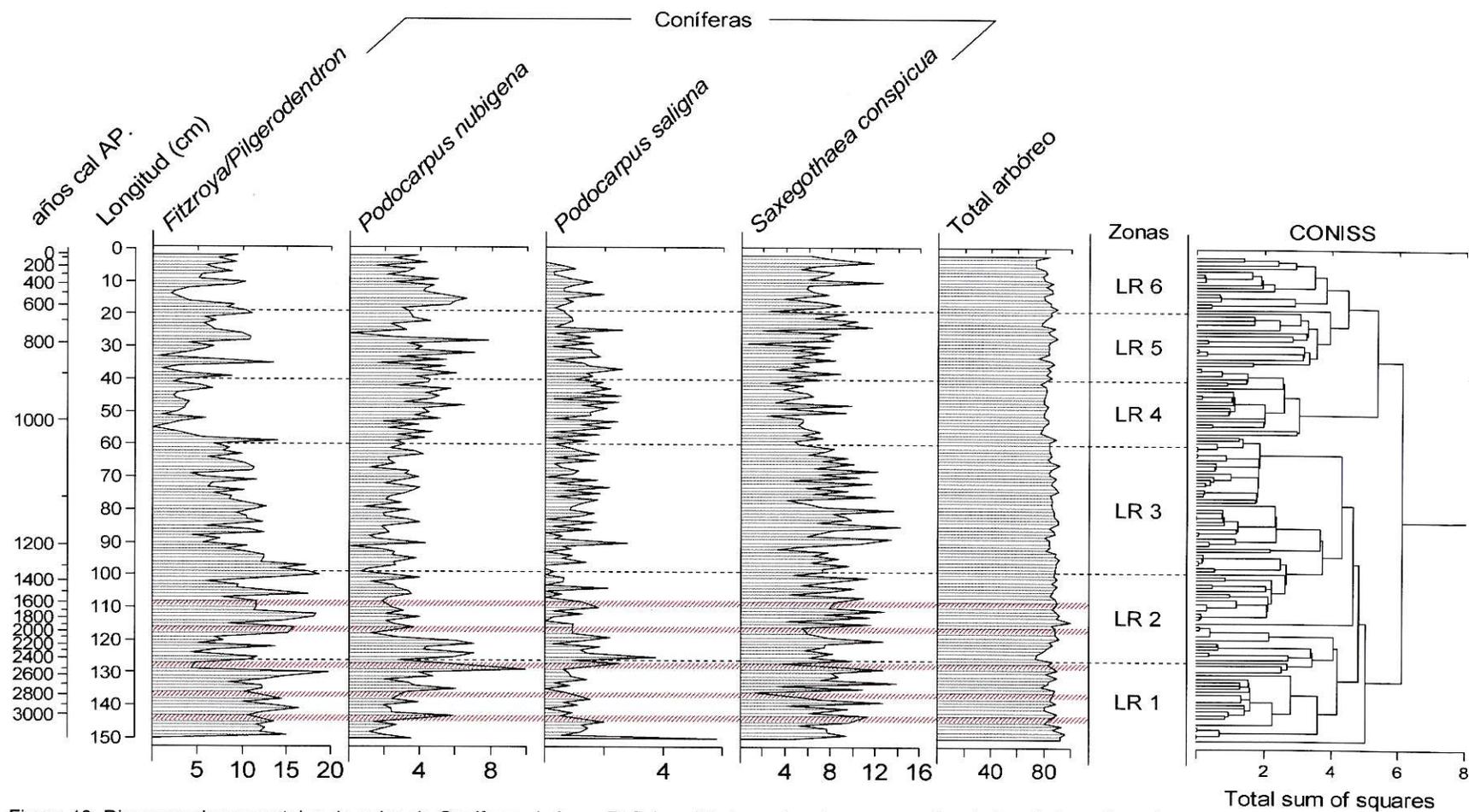


Figura 13. Diagrama de porcentajes de polen de Coníferas de Lago Reflejos. El eje y primario corresponde a la longitud con las tefras comprimidas a 1 cm. El eje y secundario muestra el modelo de edad en años cal AP. Se observa el dendrograma de CONISS y las zonas polínicas. Las zonas achuradas corresponden a la posición de las tefras en la columna sedimentaria.

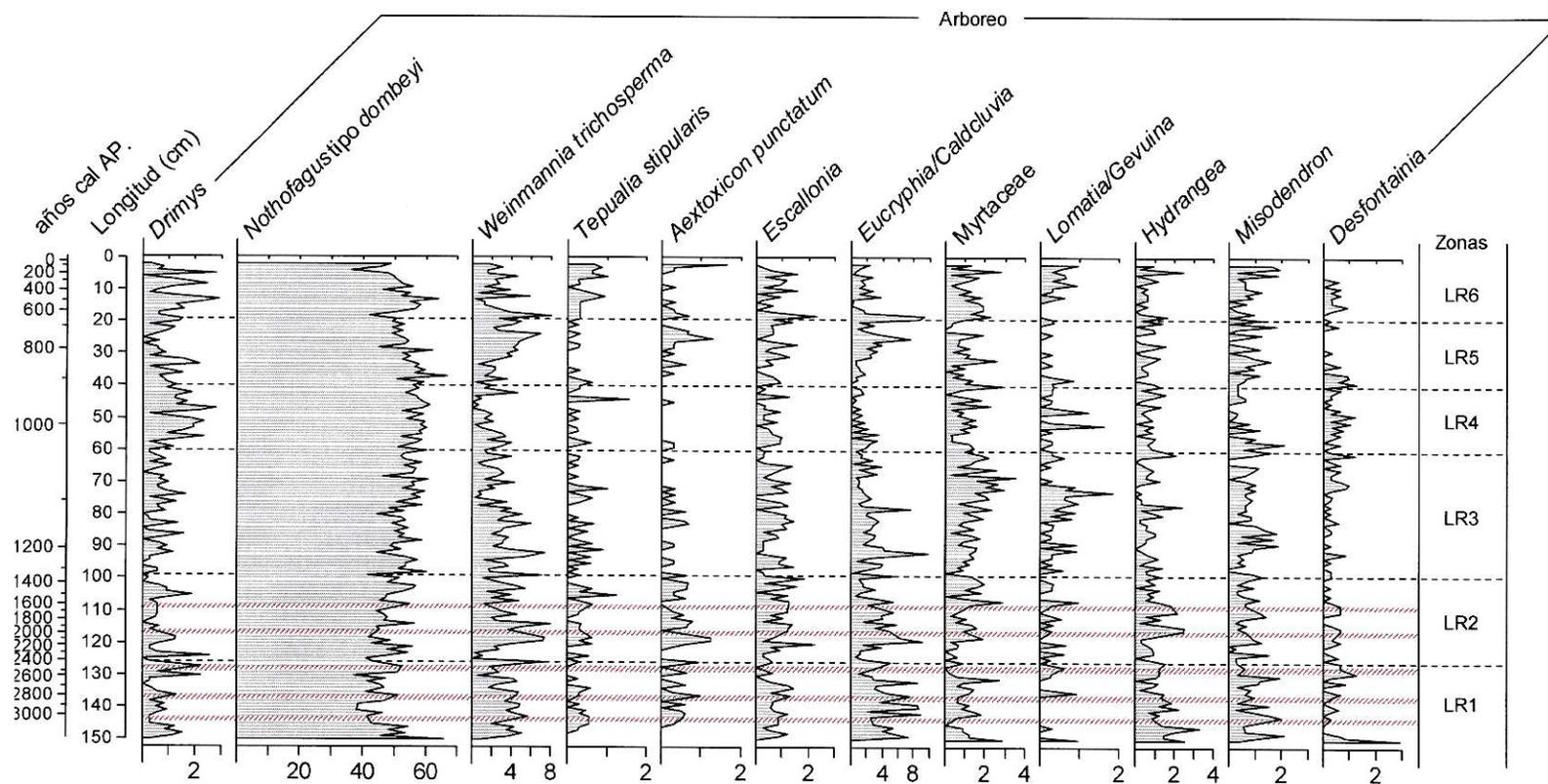


Figura 14. Diagrama de porcentajes de polen Arboreo de Lago Reflejos. El eje y primario corresponde a la longitud del testigo con las tefras comprimidas. El eje y secundario muestra el modelo de edad en años cal AP. Las zonas achuradas corresponden a la posición de las tefras en la columna sedimentaria. Se presentan las divisiones de las zonas polínicas.

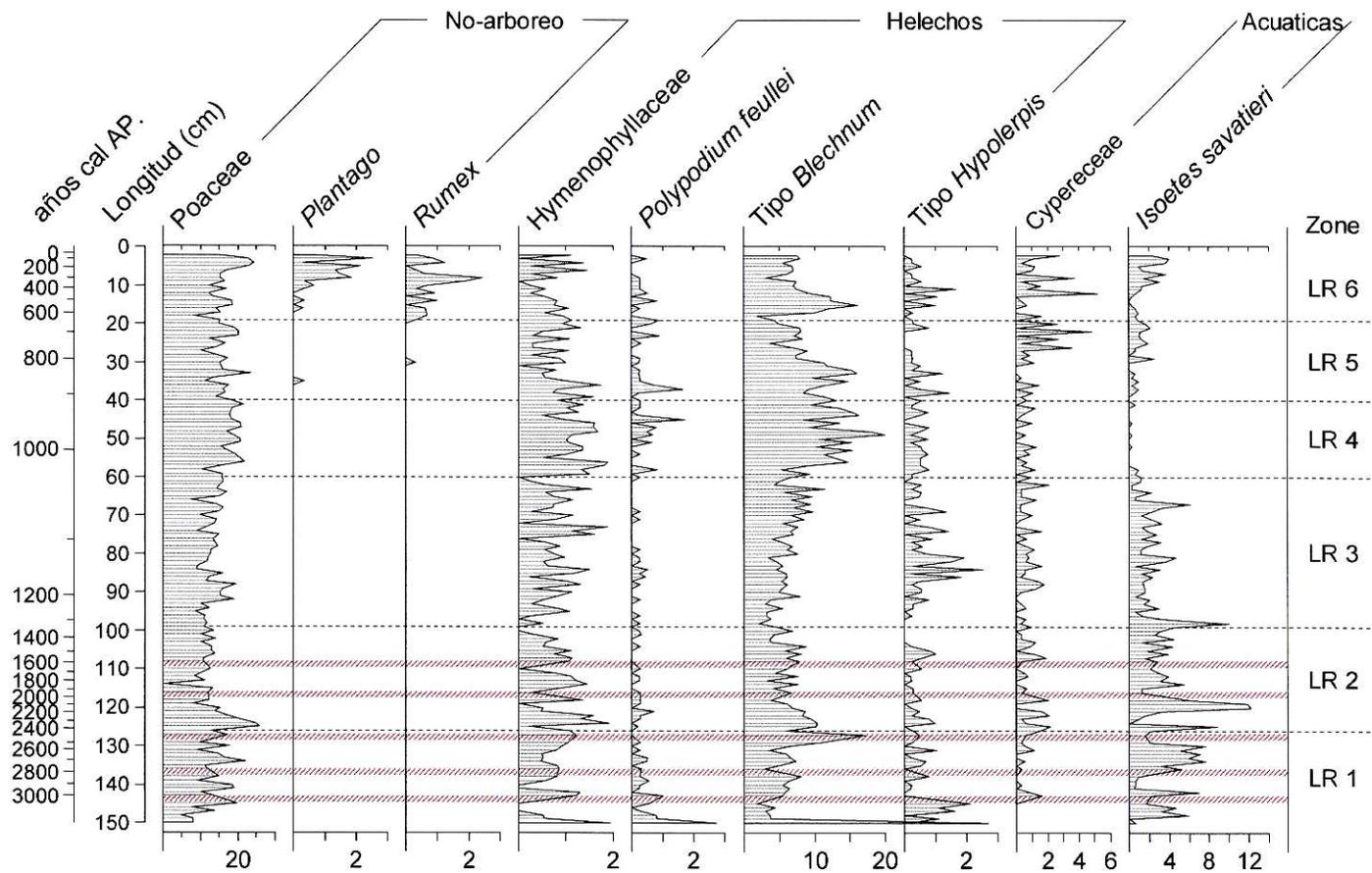


Figura 15. Diagrama de porcentajes de polen no arbóreo de Lago Reflejos. Se observan las divisiones de las zonas polínicas y el modelo de edad en años calendario antes del presente (años cal AP). El eje y primario corresponde a la longitud del testigo con las tefras comprimidas. Las zonas achuradas corresponden a la posición de las tefras en la columna sedimentaria.

4.2.4 ANÁLISIS DE PARTÍCULAS MICROSCÓPICAS DE CARBÓN

En cada uno de los niveles polínicos analizados se reconocieron y contaron las partículas microscópicas de carbón. Los valores obtenidos fueron transformados a Tasas de Acumulación ($TA = \text{partículas/cm}^2/\text{año}$) y se muestran en la Figura 16 junto a la TA de carbón macroscópico (Valenzuela, 2007). El registro de carbón de Lago Reflejos comienza con un pequeño pulso de actividad de fuego hace ~3000 años cal AP (145 cm), luego permanece en valores mínimos de TA durante los siguientes 1500 años (145-100 cm), tramo estratigráfico correspondiente a las zonas polínicas LR1 y LR2. Posterior a eso se inicia un sostenido incremento en la TA de carbón microscópico que llega a sus valores máximos entre 1200 -1000 años cal AP (80-55 cm), durante las zonas polínicas LR3 y LR4, luego disminuye durante los siguientes 1000 años llegando a valores mínimos de acumulación hacia el techo del registro (zonas LR5 y LR6).

La TA de carbón macroscópico presenta diferencias con el carbón microscópico, el aumento en la acumulación de partículas de carbón ocurre a partir de 1150 años cal AP (80 cm), aproximadamente 300 años (20 cm) después que el aumento en la TA de carbón microscópico. El pulso de aumento en la TA de carbón macroscópico (zona LR3) es de menor extensión aunque llega a su máximo junto con el carbón microscópico, la tendencia de disminución se inicia a los 1100 años cal AP, con un leve pulso de actividad anterior a 1000 años cal AP. La actividad de fuego registrada por el carbón macroscópico disminuye o es nula entre 1000 y 900 años cal AP (zona LR4). Se observa un aumento en TA en dos pulsos discretos: 900-800 y 500-400 años cal AP, posterior a ello alcanza sus valores mínimos hacia el presente.

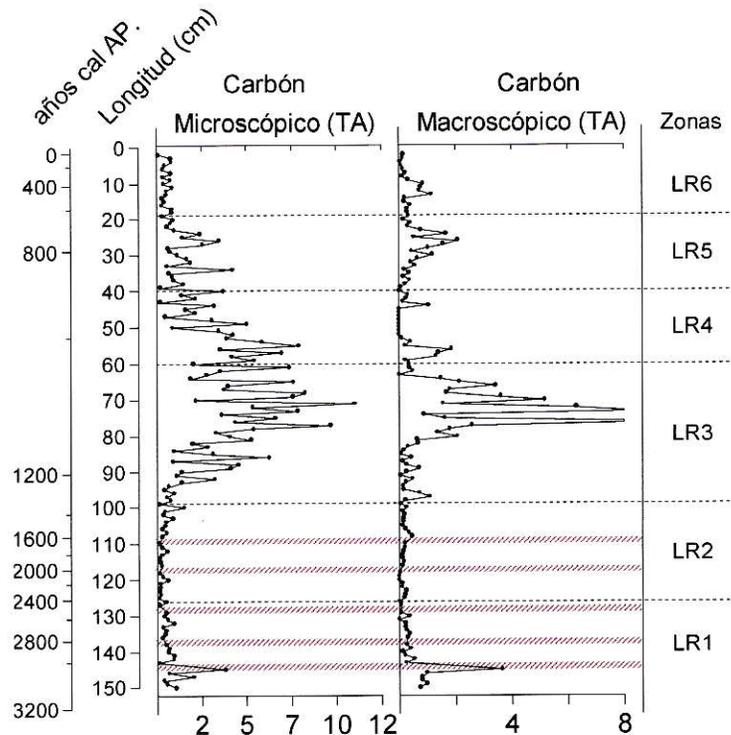


Figura 16. Registro de partículas macroscópicas y microscópicas de carbón del registro sedimentario de Lago Reflejos. Los valores corresponde a tasas de acumulación de partículas (TA = partículas/cm²/años), las líneas achuradas a tefras presentes en la columna sedimentaria. Se presentan la correspondencia de las zonas polínicas descritas con anterioridad.

4.2.5 ANÁLISIS DE PARTÍCULAS MACROSCÓPICAS DE CARBÓN

El análisis de la serie temporal de partículas macroscópicas de carbón de Lago Reflejos mediante el programa CharAnalysis (Figura 17) fue realizado usando una interpolación de 12 años entre muestras, filtrada mediante un lowess robusto a outliers con una ventana temporal de 400 años para obtener el background (C_{back}). Se utilizó un valor umbral de 0.99 y 500 años para calcular la frecuencia de C_{peak} . Al igual que en L. Campanario analizamos la serie de densidad seca inorgánica de PPI con la finalidad de documentar las posibles asociaciones entre tefras y aumento de actividad de fuego.

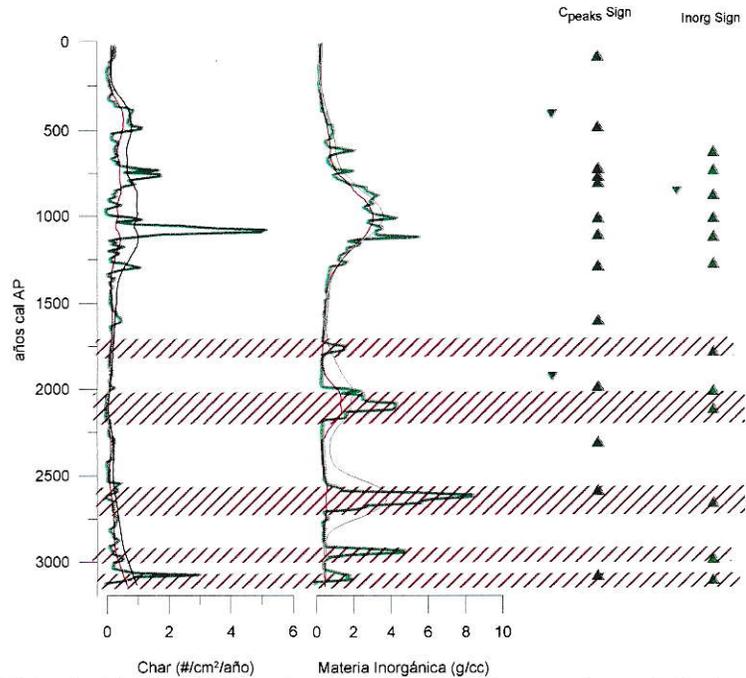


Figura 17. Análisis de Tasa de acumulación y densidad seca de materia inorgánica de Lago Reflejos a través de CharAnalysis. La curva roja corresponde al Background (C_{back}). La curva negra al valor umbral. Los C_{peak} de carbón significativos (▲) representan a los eventos locales de fuego. Las tefras de la columna sedimentaria definida a través de PPI y de la litología del registro se marcan con una zona achurada. Se observan peak de niveles clástico significativos (▲) y no significativos (▼).

El Charanalysis de Lago Reflejos muestra una actividad constante de fuego y de deposición de niveles clásticos durante los últimos 3200 años, evidenciado por la recurrencia de C_{peak} a lo largo del registro. Las tefras con edades inferidas de 3100 y 2700 años cal AP preceden a la ocurrencia de dos C_{peak} , las otras tres tefras reconocidas del registro no están asociadas a eventos locales de fuego. En el tramo temporal donde se observa el mayor número de C_{peak} es entre 1400 y 700 años cal AP, en este tramo también es posible observar aumentos significativos en el contenido de materia inorgánica de los sedimentos (Figura 17).

Buscando maximizar la visualización de la variabilidad el tramo de mayor actividad de fuego y considerando que existen diferencias en la tasa de deposición a lo largo del registro se

restringió la utilización de CharAnalysis a los últimos 2000 años. De esta forma homogenizamos el criterio de análisis entre Lago Reflejos y Lago Campanario.

CharAnalysis muestra recurrencia de C_{peak} durante los últimos 2000 años (Figura 18), sin mostrar variaciones importantes a lo largo del registro. Se obtiene un total de 9 C_{peak} de los cuales 1 es considerado no significativo (421 años cal AP). La tasa de acumulación de partículas macroscópicas de carbón presenta 3 pulsos de actividad de fuego que se asocian a los C_{peak} acotados cronológicamente entre 1000 y 400 años cal AP. Un aumento en la frecuencia de C_{peak} es observada entre 2000-900 años cal AP, luego existe una disminución en la frecuencia de C_{peak} entre 900-400 años cal AP, la que vuelve a presentar un leve aumento durante los últimos 400 años

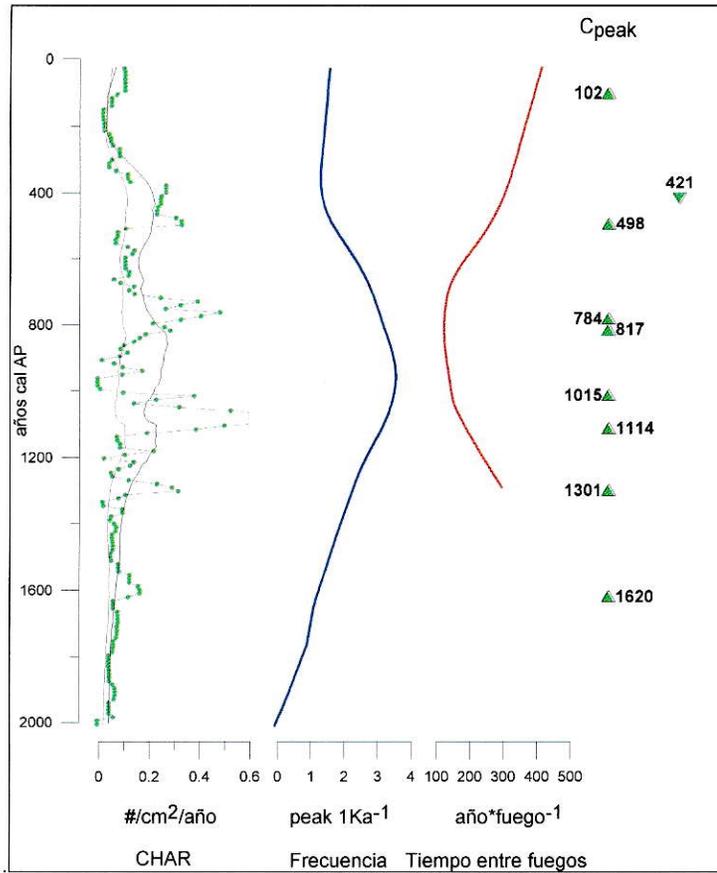


Figura 18: Análisis de la tasa de acumulación de carbón macroscópico de Lago Reflejos con CharAnalysis. El gráfico corresponde a la tasa de acumulación, Frecuencia de eventos de fuego cada 500 años y el tiempo entre eventos de fuego, la curva roja corresponde al background y la curva negra al valor umbral. Se presentan las edades inferidas de cada C_{peak} significativo (▲) y no significativo (▼). El eje y corresponde al modelo de edad en años calendarios antes del presente.

5. DISCUSIÓN

Los registros de polen y carbón de alta resolución analizados en esta tesis permiten caracterizar cambios en la vegetación y en los regímenes de fuego de la Región de los Lagos chilena durante los últimos 3000 años, los que se evidencian principalmente en las zonas bajas del área de estudio. Los datos presentados sugieren que variaciones en las condiciones climáticas, principalmente asociadas a variaciones en el régimen de precipitación, serían uno de los principales reguladores de cambios vegetacionales y de paleofuegos observados en los sitios de estudios. En algunos tramos temporales es posible observar asociaciones discretas entre depositación de tefras o actividades antrópicas europeas con variaciones en la vegetación y los eventos de fuego. Las consideraciones generales y particulares son discutidas a continuación.

5.1 LAGO CAMPANARIO

5.1.1 CAMBIOS VEGETACIONALES

El registro polínico de Lago Campanario muestra abundancia de taxa característicos del Bosque Valdiviano como *Eucryphia/Caldcluvia* y *A. punctatum* junto con *Hydrangea*, *N. tipo dombeyi* y Poaceae. Notables cambios vegetacionales son observados en este sitio. Los principales cambios se observan en la alternancia entre *N. tipo dombeyi*, Poaceae y especies termófilas como *Eucryphia/Caldcluvia*. Las especies termófilas presentan altos porcentajes desde 3200 años cal AP, los cuales se mantienen relativamente constantes hasta 2200 años cal AP. A partir de ese momento comienza un aumento en los porcentajes de taxa asociados a Bosque Norpatagónico como *N. tipo dombeyi* y de *W. trichosperma*, un aumento en *Misodendron* en este tramo es interpretado como un aumento en la presencia local de *Nothofagus* (zona LC1). Una disminución en *N. tipo dombeyi* es observada a partir de 1300 años cal AP (zona LC2) con

una duración de aproximadamente 500 años, durante este tramo se restablece la expansión de taxa como *Eucryphia/Caldcluvia* y *Poaceae*, lo cual es considerado como una disminución en las precipitaciones o aumento en las temperaturas. El tramo temporal correspondiente a la zona LC3 muestra nuevamente disminución de especies asociadas a condiciones de bosque valdiviano y un aumento en *N. tipo dombeyi* lo que es interpretado como aumento de precipitaciones, en el tramo entre 550 y 350 años cal AP (LC4) se observa una nueva disminución de *N. tipo dombeyi* que es acompañada por expansión en *Eucryphia/Caldcluvia*, *Hydrangea* y *Misodendron*.

Durante los últimos 400 años en Lago Campanario permanecen relativamente constantes los porcentajes de *N. tipo dombeyi* y *Eucryphia/Caldcluvia*; en este tramo temporal se presentan importantes aumentos en *Poaceae* y la aparición en el registro de especies introducidas como *Rumex* y *Plantago* posiblemente asociado a la disminución del estrato arbóreo. La asociación entre colonización europea y especies introducidas se discute en la siguiente sección.

5.1.2 REGÍMENES DE PERTURBACIÓN

DEPOSITACIÓN DE TEFRAS. En la columna estratigráfica de L. Campanario se registran seis tefras en las zonas polínicas LC1 y LC2, donde no se observan cambios importantes en los porcentajes de polen asociados a estas tefras (Figuras 5, 6 y 7). Sólo es posible apreciar un leve incremento de *Misodendron* y *Blechnum* posterior a la depositación de tefras. Esta relación podría indicar la apertura del dosel arbóreo en el área o fragmentación, ya que este helecho y la hemiparásita de *Nothofagus* ocupan los bordes de fragmentos y zonas abiertas con buena luminosidad.

La depositación de una tefra con edad máxima de 3480 años cal AP (Figura 3, tabla 2) se asocia a la ocurrencia de peaks de carbón macroscópico adjudicable a eventos locales de fuegos (significativos y no significativos), los cuales ocurren de forma posterior a su depositación, en este periodo se registra baja TA de partículas de carbón (Figura 9), la asociación cronológica entre depositación de tefras y eventos locales de fuego inferidos por CharAnálisis es considerado como evidencia de que la depositación de material volcánico pudo actuar como un agente de ignición de los eventos locales de fuego, esta situación ocurre en momentos de baja actividad de fuego local y regional (Figura 8). Una situación similar ocurre en las 3 tefras presentes entre 1100 y 1300 años cal AP, las que se asocian a un marcado aumento en la TA de corta duración y en la tefra con edad máxima de 850 años cal AP (Figura 3, tabla 2) la cual precede el inicio de aumento de TA de carbón. La tefra de mayor espesor en el registro corresponde a aquella con edad máxima cercana de 2400 años cal AP, la cual no se asocia a C_{peak} significativos. La ausencia de eventos locales de fuego de edad cercana a la depositación de este nivel clástico proporciona evidencia contraria a una relación causal entre tefras y fuegos locales, lo que estaría asociado a las características particulares de dicha erupción volcánica, posiblemente existió ausencia de material piroclástico que gatillara fuegos locales en el área, o bien que las condiciones climáticas no favorecieran la ocurrencia y propagación de incendios que dejaran una señal de fuego estratigráficamente reconocible .

REGÍMENES DE FUEGO. La ocurrencia de paleofuegos en Lago Campanario está fuertemente asociada a cambios en los porcentajes de *N. tipo dombeyi*, es así como las disminuciones más importantes en este tipo polínico son sincrónicas con aumento en la actividad de fuego. Dicho aumento es acompañado a su vez por la expansión de especies oportunistas como *Drimys*, *Blechnum* y taxa termófilos como *Eucryphia/Caldcluvia* (Figuras 5, 6 y 7) lo cual reflejaría la asociación entre ocurrencia de fuego y clima, el cual correspondería a condiciones mas cálidas y/o disminución de temperaturas. El análisis de partículas microscópicas de carbón de L.

Campanario reproduce los patrones observados en el carbón macroscópico (Figura 8). Registros de carbón macroscópico son indicativos de paleofuegos locales (Whitlock & Larsen 2002; Whitlock & Anderson 2002), mientras que los fuegos extralocales o regionales están representados por el carbón microscópico debido a la mayor posibilidad de dispersión por viento que presentan estas partículas. La clara similitud entre la señal regional y local de paleofuegos en LC es un indicador de que los fuegos en el área de estudio están modulados principalmente por las condiciones climáticas, dado que cambios en las condiciones climáticas que favorezcan la ocurrencia de fuegos (como disminución de precipitaciones y/o aumento de temperatura) generarían patrones regionales de eventos de fuego, lo cual se expresaría en otros sitios del área de estudio y por lo tanto partículas microscópicas de carbón presentaría el mismo patrón que los fuegos locales inferidos a partir de las partículas macroscópicas de carbón. Estos datos concuerdan con la hipótesis complementaria que plantea al clima como uno de los principales reguladores de los regímenes de fuego.

Entre 900-650 años cal AP se presenta la mayor frecuencia de eventos de fuego, lo que conlleva un menor tiempo entre eventos de fuego, bajo este patrón de recurrencia, la vegetación cuenta con un menor tiempo de restauración de la cobertura vegetal y de los horizontes más superficiales de suelo lo que facilita los procesos erosivos post-fuego y por lo tanto un aumento en el contenido inorgánico de los sedimentos. Los pulsos de alta actividad de fuego entre 900-650 años cal AP y durante los últimos 350 años están asociados a una gran cantidad de peaks no significativos de densidad seca de materia inorgánica. Esta asociación es interpretada como evidencia de procesos erosivos post fuego, gatillados por disminución de la cobertura vegetal, inestabilidad de sustratos y el resultante incremento de la escorrentía hacia el lago.

EFFECTO ANTROPOGÉNICO Y COLONIZACIÓN EUROPEA. El registro de polen de LC muestra expansión de taxa exóticos que pueden asociarse a colonización europea como *Rumex* y *Plantago* desde 350 años cal AP (Figura 7). Sincrónicamente se observa un aumento en la actividad de fuego local y regional (Figura 8) y aumento en la frecuencia de eventos de fuego (Figura 9), conjuntamente con esto, se observa un aumento en Poaceae, la cual posiblemente puede corresponder a *Chusquea* que coloniza sitios perturbados por eventos de fuego o caídas de árboles. Los peak de carbón estadísticamente significativos según CharAnalysis presentan edades entre 330 y 100 años cal AP, lo cual es concordante con los relatos históricos que registran el establecimiento de los colonizadores españoles en la región en 1554 AD, hace 400 años cal AP y el inicio de la colonización alemana en el año 1850 AD, es decir 100 años cal AP (Rothhammer et al. 2000, Tampe, 2003). Estos antecedentes proveen evidencia concluyente para documentar el efecto europeo en el área de estudio durante los últimos 350 años, pudiendo ser responsables en gran parte de los cambios vegetacionales observados en esta zona polínica (LC5) como serían la expansión de Poaceae y Asteraceae/Liguliflorae, la disminución de *N. tipo dombeyi*, junto con la aparición y expansión de *Rumex* y *Plantago*.

5.2. LAGO REFLEJOS

5.2.1 CAMBIOS VEGETACIONALES

El registro polínico de Lago Reflejos muestra predominio de taxa característicos de los Bosques templado-lluvioso Nordpatagónicos con coníferas de las familias Podocarpaceae y Cupressaceae, en un contexto de permanente dominancia de *N. tipo dombeyi* durante los últimos 3000 años.

A diferencia de lo observado en Lago Campanario, no es posible observar grandes cambios vegetacionales a lo largo del registro de L. Reflejos debido principalmente al alto porcentaje que alcanza *N. tipo dombeyi*, tipo polínico dentro del cual están *N dombeyi* y *N nitida* los cuales se adaptan a temperaturas frías y condiciones de alta humedad y colonizan suelos volcánicos zonas perturbadas por derrumbes, caídas de árboles por el viento y deslizamientos de tierra (Veblen 1985, 1989; Villagrán 1993, Donoso 1987, 2006) y están presentes en los alrededores del lago. Un gran número de fluctuaciones son registradas en el tramo basal (3100-2500 años cal AP, zona LR1), entre 2700 y 2500 años es posible observar aumento en en Poaceae y *P. nubigena* especie tolerante a la sombra, que se desarrolla en suelos mal drenados y en ambientes frío-templados, el cual se correlaciona con disminuciones en *W. trichosperma* y especies del bosque valdiviano como *Eucryphia/Caldcluvia*, *Escallonia*, *Aextoxicum punctatum* y Myrtaceae, las cuales presentan bajos valores de porcentajes a lo largo del registro. En este tramo también disminuye *Fitzroya/Pilgerodendron*. Esta disminución abrupta de taxa valdivianos tiene corta duración, ya que a los 2400 años cal AP se producen una rápida recuperación de éstos, seguido de una nueva disminución de sus porcentajes entre 2200 y 1400 años cal AP (LR 2).

A partir de 1400 años cal AP (LR3) comienza una disminución de *Fitzroya/Pilgerodendron* que tiene una duración de aprox. 400 años, a partir de 1200 años cal AP también es observada una disminución en *S. conspicua*, ambas especies se desarrollan en ambientes relativamente fríos y húmedos. Entre 1100 y 900 años cal AP se observa un aumento en *Drimys* y un leve aumento en *P. nubigena*. *Aextoxicon punctatum* desaparece mientras que *Fitzroya/Pilgerodendron* y *S. conspicua* presentan sus porcentajes mínimos (LR 4). En los últimos 900 años es posible observar una alternancia entre aumentos de *Drimys* y disminución de *W. trichosperma*.

Marcados cambios se observan en los porcentajes de *Isoetes savatieri*, una especie acuática que suele habitar ambientes litorales de bordes de lagos, son observados en la estratigrafía polínica de Lago Reflejos (Figura 15). Entre las zonas LR1 y LR3 *I. savatieri* se encuentra presente con altas fluctuaciones en sus porcentajes, entre LR4 y LR5 esta especie presenta valores mínimos llegando incluso a estar ausente del registro polínico (LR4), para luego reaparecer y expandir en los últimos 400 años (LR6). Debido a que los sedimentos de L. Reflejos fueron obtenidos de la parte central y más profunda del Lago, interpretamos la disminución de *I. savatieri* entre 1050-900 años cal AP (LR4) como un aumento en el nivel del lago. Es decir, un incremento en el nivel del lago alejaría del sitio de muestreo la señal de polen de *I. savatieri* ya que esta especie ocupa los bordes de lagos y no las zonas más profundas, esta situación se expresaría como una disminución en el porcentaje de polen. Esta interpretación es apoyada por una disminución en los taxa termófilos y aumento en el helecho tipo *Blechnum* los cuales estarían respondiendo a un aumento en las precipitaciones. Paralelamente el registro de partículas de carbón macroscópico y microscópico muestra ausencia y disminución en su actividad (ver sección 5.2.2)

La aparición de *Rumex* y *Plantago*, especies introducidas por los europeos, en L. Reflejos ocurre hace aprox. 600 años cal AP (Figura 15). Estos taxa presentan porcentajes cercanos al 2% y a diferencia de lo observado en Lago Campanario su aparición y expansión no se asocian a un aumento en las Poaceae.

5.2.2 REGÍMENES DE PERTURBACIÓN

DEPOSITACIÓN DE TEFRAS: El registro de L. Reflejos contiene 5 niveles piroclásticos de diferente espesor (Figura 11) distribuidos entre las zonas polínicas LR1 y LR2 (Figuras 13, 14 y 15). El registro de polen no presenta una respuesta notoria frente a la depositación de estas

tefras (Figuras 13, 14 y 15), respondiendo de manera variable los distintos taxa a cada uno de los niveles clásticos de origen volcánico. Es posible observar en dos ocasiones peak de fuego posteriores a la depositación de tefras (3150 y 2600 años cal AP), en los otros tres casos no se encuentra asociación estratigráfica con eventos de fuego (Figura 17).

REGÍMENES DE FUEGO: Los patrones de fuego local y regional reconstruidos a partir de las partículas macroscópicas y microscópicas de L. Reflejos muestran un patrón regional de aumento de actividad de fuego (~1300 años cal AP), el cual presenta una mayor extensión cronológica que en L. Campanario. Igual situación es observada en la posterior disminución de actividad de fuego donde la caída de actividad extra-local (~1000 años cal AP) inferida a partir del registro microscópico de partículas de carbón es posterior y más gradual que el registro de partículas macroscópicas (Figura 16).

En el registro polínico de L. Reflejos es posible observar que *Drimys* y tipo *Blechnum* tienen un comportamiento en antifase con los dos periodos de mayor actividad de fuego local (LR6- LR4), una interpretación de este patrón es que dichos taxa son beneficiados por la apertura de claros que generados por la acción del fuego, ya que han sido descritos como taxa semitolerantes a la sombra. Esta asociación en antifase entre fuego local, *Drimys* y tipo *Blechnum* no se observa en el registro de partículas microscópicas de carbón, lo cual es concordante con la concepción de que dichas partículas representan actividad de fuego extralocal.

Al comparar las series temporales de densidad seca de materia inorgánica y partículas de carbón macroscópicas a través de CharAnalysis vemos que hay una asociación entre niveles clásticos no piroclásticos significativos y eventos locales de fuego. Esto puede explicarse por la ubicación particular de L. Reflejos el cual pese a ser una cuenca cerrada, se encuentra base un rodeado por abruptas pendientes propias de un circo glacial en un sector relativamente alto de

los Andes del sur y, por lo tanto, sometido a lluvias orográficas recurrentes. Todos estos factores contribuyen a que los procesos de escorrentía y erosión post-fuego puedan condicionar un aporte significativo de material inorgánico al lago.

EFFECTO ANTROPOGÉNICO Y COLONIZACIÓN EUROPEA: el registro de polen de L. Reflejos muestra expansión de taxa exóticos asociados a la colonización europea (*Rumex* y *Plantago*) asociados a un leve aumento en la frecuencia de fuegos locales. De acuerdo a la cronología disponible, esta expansión comenzó hace ~600 años y el primer C_{peak} significativo en este tramo tiene una edad interpolada de 498 años cal AP. Estas edades preceden a los registros históricos de ocupación europea en la zona (Rothhammer et al. 2000, Tampe, 2003), los cuales estipulan que las primeras ocupaciones en este sector comenzaron en el año 1554 AD, es decir unos 100-150 años después del inicio de la expansión de *Rumex*, *Plantago* y fuegos locales asociados. Estas diferencias son adjudicables a imprecisiones en la cronología, específicamente existen en L. Reflejos dos dataciones con edades muy cercanas (720 ± 80 años ^{14}C AP a los 17 cm y 765 ± 60 años ^{14}C AP a los 25 cm), probablemente la datación más superficial es anómalamente antigua por retrabajo de material al interior de la cuenca. Esta sospecha se ve reforzada por otros registros de polen en la región los cuales muestran expansión de dichos taxa durante en zonas costeras y el valle longitudinal durante los últimos 300 años (Moreno, datos no publicados). Con nuevas dataciones tanto de ^{14}C y de ^{210}Pb se espera acotar de mejor manera este tramo del registro de Lago Reflejos.

5.3 COMPARACION ENTRE SITIOS

5.3.1 CAMBIOS VEGETACIONALES.

L. Reflejos y L. Campanario muestran claras diferencias en los cambios vegetacionales observados durante los últimos 3000 años. Lago Campanario un sitio de baja altitud (47 m.s.n.m) evidencia alta magnitud de cambios vegetacionales con variaciones importantes en los ensamblajes dominantes, mientras que L. Reflejos sugiere poco cambio vegetacional durante los últimos 3000 años. La ubicación de los sitios de estudios nos permiten pensar dos tipos vegetacionales distintos de los bosques templados que dominan el área de estudio, L. Campanario representa el ensamblaje de bosque Valdiviano, mientras que L. Reflejos corresponden a bosque Nordpatagónico con presencia de coníferas, estas diferencias se ven reflejadas en los registros polínicos donde existe mayor resolución taxonómica y diversidad de especies en el Bosque Valdiviano. Una consideración importante es la resolución taxonómica gruesa del registro de L. Reflejos la cual probablemente impide visualizar cambios en la vegetación en aquellos taxa polínicos que constituyen un porcentaje importante de los ensamblajes (como *N. tipo dombeyi* o *Fitzroya/Pilgerodendron*). Otro componente que puede dar cuenta de las diferencias de los cambios vegetacionales de ambos sitios son los contextos climáticos en los que cada sitio se encuentra, es decir las diferencias en altitud y por lo tanto en las temperaturas y precipitaciones pueden marcar diferencias en el impacto de estas variables en la vegetación, es así como en la zonas bajas donde los cambios de humedad son más estacionales y se ven menos influenciadas por efectos orográficos, las variaciones en ellas son fuertemente visibles los ensamblajes vegetacionales.

Algunos estudios palinológicos realizados en la Región de los Lagos han discutido asociaciones estratigráficas entre *W. trichosperma*, *T. stipularis*, Poaceae y partículas de carbón, los cuales presentarían aumentos en sus abundancias asociadas a paleofuegos. Dicha relación no es observada en los registros de Lago Reflejos y Lago Campanario. En el caso de *W. trichosperma* y *T. stipularis* en Lago Campanario presentan leves aumentos asociados a mucha variabilidad posterior al primer pulso de alta actividad de fuego (1200 años cal AP), situación que no es reproducida por el segundo pulso. Una disminución en *N.* tipo *dombeyi* es observada pero sólo en uno de los periodos (1200-1100 años cal AP), ya que para el segundo aumento de actividad de fuego, *N.* tipo *dombeyi* aumenta junto con el carbón (900-750 años cal AP). Poaceae no presenta asociaciones positivas con fuego en este registro. Situación similar es observada en el registro de Lago Reflejos, donde el fuego no presenta mayor efecto no sólo en estas especies, sino que en forma general durante el registro. La mayor pluviometría que presenta Lago Reflejos debido a la altitud y el efecto orográfico, podría estar controlando el efecto de los fuegos en la zona, impidiendo que los fuegos que afectaron el sector presentaran alta severidad e intensidad, y por lo tanto el registro polínico no logra censar dicha actividad de fuego.

5.3.2 DEPOSITACIÓN DE TEFRAS

L. Campanario y Lago Reflejos presentan un número similar de niveles piroclásticos (Figuras 3 y 11). Según los fechados radiocarbónicos la tefra datada en ~ 2400 años cal AP estaría presente en ambos sitios. Este nivel corresponde a la tefra de mayor espesor en ambos lagos y está presente en otros sitios a nivel regional (Moreno datos no publicados; Valenzuela, 2007) por lo cual representaría un evento volcánico de gran magnitud que dejó registro a nivel regional, sin embargo en ninguno de los sitios estudiados en esta tesis es posible detectar algún cambio vegetacional mayor coetáneo con dicho evento.

Es posible observar a través de CharAnalysis asociaciones entre eventos locales de fuego y depositación de tefras, lo que se observa con mayor claridad en L. Campanario (Figuras 9 y 10). Estas asociaciones corresponden a eventos discretos en los que posiblemente la actividad volcánica fue un gatillante de eventos de fuego, o bien, provocó muerte de cobertura vegetal lo que dio paso a un aumento en el material combustible disponible para ser quemado. En L. Reflejos se observa menor relación entre fuego y actividad volcánica, esto puede deberse a que los montos de precipitación anuales a esa altitud son cercanos a los 4000 mm, disminuyendo la probabilidad de incendios, situación que no ocurre en las zonas bajas donde la precipitación anual alcanza los 1300 mm y sigue patrones más estacionales. Los datos de ambos lagos muestran que la asociación de eventos de fuego y depositación de tefras es mayor en periodos donde la ocurrencia de eventos locales de fuego es baja. Si asumimos que el principal regulador de la actividad de fuego es el clima, observaremos que cuando las condiciones climáticas no sean favorables para la ocurrencia y propagación de los fuegos, otros factores como la actividad volcánica tienen un rol más preponderante actuando posiblemente como gatillante de eventos de fuego, razón por la cual es posible observar una correlación más clara entre ellos durante dichos periodos.

En ambos lagos estudiados es posible observar aumento en la densidad seca de materia inorgánica en los sedimentos posterior a eventos de fuego, lo cual es interpretado con un aumento de los procesos erosivos en los alrededores de los lagos debido a la pérdida de cobertura de vegetación y al aumento de escorrentía que ocurren de forma posterior a la ocurrencia de fuego.

Una característica importante de L. Reflejos es que en el análisis de la densidad seca de materia inorgánica realizado a través de CharAnalysis reconoce un alto número de peak inorgánicos significativos (Inorg sig ▲) a diferencia de lo observado en L. Campanario, esta

situación esta siendo posiblemente regulada por la características de la cuenca de L. Reflejos, la cual al estar ubicada en la base de un circo glacial presenta una mayor escorrentía de las laderas que los rodean y por lo tanto un mayor aporte de material inorgánico a los sedimentos.

5.3.3 ACTIVIDAD DE FUEGO

Una similitud importante entre L. Campanario y L. Reflejos es el registro de alta actividad fuego local y extralocal en el rango temporal de 1200-900 años cal AP inferido a partir del aumento en la acumulación de partículas de carbón en los sedimentos (TA). Esta coherencia temporal en la señal de paleofuegos apoya la hipótesis de que uno de los principales reguladores de los patrones regionales de fuego son las condiciones climáticas.

Los tipos polínicos Tipo *Blechnum* y *Drimys* no presentan la misma respuesta después de la ocurrencia de fuego en ambos sitios. En Lago Reflejos, se ven favorecidos expandiendo de forma posterior a los dos periodos de mayor actividad de fuego, en Lago Campanario *Drimys* no presenta ningún patrón asociado a la actividad de fuego y tipo *Blechnum* disminuye de forma posterior al paleofuego. Estudios de germinación realizados en la Isla Grande de Chiloé donde se evaluó la colonización de *Drimys winteri* sobre distintos sustratos, gradientes de humedad y cobertura del dosel proponen que la sobrevivencia de *Drimys* no se vería mayormente afectada por el tipo de sustrato y cobertura, sin embargo la cobertura se relacionaría mas bien con la humedad del sustrato ya que *Drimys* sería afectada negativamente por desecación de verano (Díaz & Armesto 2007). Bajo estas consideraciones la respuesta positiva de *Drimys* en Lago Reflejos a la actividad de fuego podría estar asociada al poco efecto que dicha actividad tendría sobre la cobertura de especies arbóreas como *Nothofagus* lo que evitaría que *Drimys* fuera expuesta a condiciones más secas en el periodo estival; situación contraria a la ocurrida en Lago Campanario, donde la reconstrucción polínica evidencia disminuciones importantes en *N.*

tipo *dombeyi* y aumento de Poaceae.

5.3.4 ASENTAMIENTOS HUMANOS Y COLONIZACIÓN EUROPEA

Diversos registros de ocupaciones humanas anteriores a 3000 años cal AP han sido documentados en la Región de los Lagos chilena (Dillehay & Collins, 1988, Muñoz & Pino, 2002, Adán et al. 2004), sin embargo la evidencia arqueológica de la zona da cuenta de la presencia de humanos desde hace varios miles de años pero no permite tener una referencia clara de la influencia que las culturas originarias pudieron ejercer sobre la vegetación y los regímenes de fuego. Diversos relatos históricos y evidencia arqueológica (Otero, 2006) hablan de una alta población indígena presente en el área de estudio a la llegada de los españoles a la zona, esto sugiere que los patrones de regímenes de fuego observados durante los últimos 3000 años pudieron haber sido influenciados por actividades antropogénicas que hubieran actuado como agentes de ignición de fuego, lo cual asociado a variaciones climáticas que favorecieran la ocurrencia de eventos de fuego darían cuenta de la actividad de fuego en la zona de estudio durante los últimos 3000 años. Registros históricos de los últimos 400 años evidencian la importante influencia que ejerció la colonización española y posteriormente alemana, en la región debido a la expansión de la población y asentamientos humanos. Es así como relatos históricos describen el uso del fuego para combatir a los pueblos indígenas y abrir territorio para establecer nuevos asentamientos y tierras para cultivos o ganadería (Gómez de Vidaurre, 1748; Elizalde, 1970; Armesto et al. 1994) lo que claramente ejerció una perturbación en la vegetación. El Registro de Lago Campanario nos ofrece un ejemplo claro de dichas actividades, tanto por los cambios vegetacionales que se observan durante ese tramo temporal como por la actividad de fuego local registrado en este periodo. L. Reflejos en cambio no registra tan claramente la colonización europea y su relación con cambios vegetacionales y actividad de fuego, pudiendo ser un buen referente de fuegos naturales durante los últimos 350

años. Si bien muestra al igual que Campanario expansión de *Rumex* y *Plantago*, no se observa claramente un aumento en la depositación de partículas de carbón durante este tiempo. Una consideración importante que hay que recordar en este tramo temporal, es que corresponde a la parte menos confiable en el modelo de edad de L. Reflejos, por lo que las diferencias en cronología de eventos y tasas de acumulación de partículas de carbón puede deberse a este hecho. También debe ser considerado que Lago Reflejos se ubica en la base lateral de un circo glacial a 800 m.s.n.m y por lo tanto es de difícil acceso, por lo cual se esperaría que presentara menor influencia e intervención antrópica que las zonas bajas y valle longitudinal, donde se enfocó principalmente la colonización europea.

5.4 INTERPRETACIÓN PALEOCLIMÁTICA E IMPLICANCIAS

Los datos presentados en este estudio muestran que durante los últimos 3000 años ha ocurrido una alta variabilidad en los regímenes de fuego y cambios vegetacionales importantes evidenciados principalmente en las zonas bajas de la Región de los Lagos.

En la base de Lago Campanario (3200 años cal AP) se observan altos porcentajes de elementos característicos de los bosques valdivianos los cuales han sido descritos como favorecidos por condiciones lluviosas con tendencia a veranos secos. En Lago Reflejos se observan los menores valores de *N. tipo dombeyi* y altos valores de *Isoetes savatieri* lo que es interpretado como condiciones más secas que las actuales entre 3200 y 1500 años cal AP en ambos registros. L. Reflejos muestra condiciones frías asociadas a valores altos de coníferas criófilas Nordpatagónicas como *S. conspicua* y *Fitzroya/Pilgerodendron*, concomitante con altos porcentajes en *Isoetes savatieri*, el cual es un indicador de bajos niveles lacustres.

Estas condiciones varían a partir de 2200 años cal AP en L. Campanario donde se da paso a una disminución de los elementos valdivianos, aumento de *N. tipo dombeyi* y altos porcentajes en los helechos tipo *Pteris*, *Blechnum* y *Polypodium feullei*. Contemporáneamente, L. Reflejos muestra un aumento en coníferas y *N. tipo dombeyi*, junto a una disminución en *Isoetes savatieri*, todo lo cual es interpretable como un aumento de precipitaciones entre 2200 y 1300 años cal AP. Asociado a este período se registra los valores mínimos de la tasa de depositación de partículas de carbón de ambos registros.

A partir de 1300 años cal AP en las zonas bajas hay expansión de los elementos termófilos y ocurrencia de fuegos. En la zona alta de la Región no se observan aumentos del componente Valdiviano de la vegetación, sin embargo es posible observar una disminución en *Fitzroya/Pilgerodendron*, taxón favorecido por condiciones relativamente templado-frías. El registro de partículas de carbón de Lago Reflejos muestra similitudes con el de L. Campanario, registrando alta ocurrencia de eventos de fuego. Este periodo de condiciones más secas dura entre 1300 y 1000 años cal AP, luego se observa una reversión de estas condiciones asociadas a disminuciones en las especies termófilas y aumento de *Nothofagus* tipo *dombeyi* junto con menor actividad de fuego, de forma posterior se observa un segundo pulso de actividad de fuego de menor magnitud, entre 900 y 650 años cal AP. En Lago Reflejos no se observa este segundo pulso de actividad de fuego, sin embargo cronológicamente está precedido por una disminución en los porcentajes de polen de *Isoetes savatieri*, el cual fue interpretado como un aumento en el nivel del Lago, posiblemente por mayores precipitaciones.

A partir de 750 años cal AP comienzan aumentos en taxa criófilos/higrófilos en L. Campanario tales como *Fitzroya/Pilgerodendron* y *N. tipo dombeyi*, a la par con disminuciones en especies termófilas como *Eucryphia/Caldcluvia* contemporáneas con la ocurrencia de fuego. El aumento de estos taxa criófilos/higrófilos es relacionado con un aumento en las precipitaciones, razón

por lo cual, la ocurrencia de fuego en este tramo no apoyaría la tesis del clima como principal regulador de la actividad de fuego, posiblemente otros moduladores como las actividades antrópicas precolombinas o la ocurrencia de tormentas eléctricas fueran los que gatillantes de los eventos de fuego registrados en este tramo temporal, otro factor al que responden positivamente las especies incluidas en morfotipo polínico *N* tipo *dombeyi* son las perturbaciones a gran escala, como erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra o caídas de árboles, sin que se registre alguna señal estratigráficamente reconocible para evaluar esta situación. Estas condiciones cambian a partir de 550 años cal AP, manteniéndose relativamente constantes los porcentajes de taxa valdivianos (termófilos y resistentes a sequías de verano) y norpatagónicos (condiciones más húmedas y menores temperaturas) hasta el presente. Una expansión de especies introducidas y disminuciones en el estrato arbóreo asociados a frecuente actividad de fuego es observada durante los últimos 400 años, lo que coincide con registros históricos de asentamientos humanos y relatos históricos de uso del fuego. Los principales cambios vegetacionales registrados durante los últimos 400 años los asociamos a actividad humana en la Región de los Lagos. Esta asociación entre actividades humanas y eventos de fuego concuerda con los estudios a nivel global sobre regímenes de fuego (Power et al. 2007).

De los datos presentados en esta tesis se infiere alta variabilidad climática a escalas centenal y multicentenal, las cuales son puntualizadas a continuación:

Entre 3200 y 2200 años cal AP, se infieren condiciones cálidas posiblemente asociadas a disminución en las precipitaciones, con baja actividad de fuego.

Entre 2200 y 1300 años cal AP las variaciones vegetacionales y de paleofuego son interpretados como un aumento de precipitaciones asociado disminución de termófilos,

ausencia de fuego y expansión de taxa Nordpatagónicos en las zonas bajas de la Región. Los registros paleoclimáticos desarrollados en el Hemisferio Norte definen durante este tramo la anomalía climática DACP (Tabla 1) que se asocia con condiciones frías y húmedas.

Condiciones más secas se presentan entre 1300-750 años cal AP, en este tramo hay una alta variabilidad, asociado a intensa actividad de fuego y a importantes variaciones en la cobertura. Dentro de este periodo se ha reportado en la literatura el periodo calido medieval (MWP) y la anomalía climática medieval (MCA). Las variaciones en las precipitaciones inferidas a partir de los registros de L Campanario y L. Reflejos proporcionan evidencia de la ocurrencia de MCA en el área debido a la similitud de sus señales (variaciones en las precipitaciones).

Un aumento de precipitaciones es observado entre 750 y 500 años cal AP. Esta interpretación es concordante con el registro de Lago Puyehue (Bertrand et al. 2005) que registra un aumento de precipitaciones, posiblemente asociado al inicio de "la Pequeña Edad de Hielo" (LIA), que ha sido reportada con diversas cronologías y extensión. Este periodo también se asocia a las temperaturas de verano bajo el promedio descritas por Lara & Villalba (1993).

Durante los últimos 350-500 años la aparición de taxa introducidos y el aumento en la frecuencia de fuegos dan cuenta de las actividades antrópicas post-europeas desarrolladas en el área de estudio, por lo que son consideradas como un agente importante en los cambios vegetacionales observados principalmente en las zonas bajas de la Región. El aumento en la capacidad de manejo y modelación del paisaje y/o comunidades vegetales que las actividades humanas han ejercido los últimos siglos dificultan la interpretación climática de este tramo temporal, por lo cual los registros dendrocronológicos desarrollados en el área de estudio y registros instrumentales de temperatura y precipitación pueden proporcionar información adicional a esta interpretación. Estas posibles asociaciones entre fuentes de información

independientes requieren una cronología fuertemente acotada para este tramo temporal.

En suma, los registros europeos que describen variabilidad multicentenal con alternancia de periodos secos/cálidos y/o frío/húmedos, presentan diversas cronologías pero patrones de variación similares, bajo estas consideraciones nuestros datos sugieren asociaciones cronológicas con las anomalías climáticas descritas en el hemisferio norte. La cronología del Periodo Cálido Romano (RWP) no es respaldada por los datos de L. Campanario y L. Reflejos, El período frío de la Edad Oscura (DACP) está acotado cronológicamente dentro del rango temporal interpretadas como un aumento de precipitaciones entre 2200- 1300 años, período en el cual expande el tipo polínico *Fitzroya/Pilgerodendron* en L. Reflejos el cual puede asociarse temperaturas frías, aunque en la zona de estudio la cronología de este evento antecede en aprox. 400 años a los registro europeos (Tabla 1).

El Período Cálido Medieval es observado en el tramo temporal entre 1300-750 años cal AP en el cual se infieren disminución de las precipitaciones, esta cronología de eventos y el tipo de señal inferida apoya la ocurrencia de una Anomalía Climática Medieval (Stine, 1994). La cronología de LIA (Pequeña Edad de Hielo) coincide con los datos aquí presentados y las condiciones de aumento de precipitaciones inferidas para el tramo temporal de 750 - 500 años cal AP.

De los registros de L. Campanario y L. Reflejos se infiere variabilidad multicentenal, la cual puede ser asociada a los patrones de anomalías climáticas descritas en el Hemisferio Norte. Dicha variabilidad es interpretada como cambios en el régimen de precipitación del área de estudio, el cual se rige principalmente por los vientos del oeste y la interacción océano-atmosfera conocida como ENSO. En el área de estudio se observan sequías de verano asociadas a eventos El Niño, por lo cual el tramo inferido de bajas precipitaciones posiblemente

este asociados a un incremento en la intensidad y/o recurrencia de estos eventos en el área de estudio, asociación que ha sido descrita con anterioridad (Kitzberger et al 2001). Esta interpretación es coherente con las relaciones descritas entre regímenes de fuego y el sistema de alta presión del Pacífico subtropical, los vientos del oeste y a variabilidad de alta frecuencia El Niño-Oscilación del Sur hechas por Kitzberger (2002), Kitzberger et al. (2001), y Whitlock et al. (2007).

6. CONCLUSIONES

- I. Cuál es la dirección y cronología de cambios vegetacionales y climáticos en la Región de lo Lagos Chilena durante los últimos 3000 años?
 - Se observan cambios en la vegetación y en la actividad de fuego durante los últimos 3000 años en el sector cordillerano de seno Reloncaví, asociadas principalmente a variaciones en las precipitaciones.
 - Entre 3200 y 2200 años cal AP son inferidas condiciones cálidas asociada a disminución de precipitaciones, con escasa actividad de fuego.
 - Entre 2200-1300 y 750-500 años cal AP se registra un aumento de las precipitaciones en el área de estudio, asociado a una disminución en los eventos fuegos locales y extra-locales.
 - Entre 1300- 750 años cal AP se infiere una disminución de las precipitaciones, asociada a intensa actividad de fuego en la Región y a cambios importantes en la vegetación y la expansión de especies oportunistas lo cual es observado principalmente en las zonas bajas.
 - Durante los últimos 500 años existe una alta variabilidad posiblemente asociada a condiciones cálidas, disminución de las precipitaciones y una fuerte influencia

de las actividades antrópicas post colonización europea, las cuales serían un factor modulador recurrente en los cambios vegetacionales y los regímenes de fuego observados durante los últimos 350 años.

II. ¿Cuáles son las relaciones entre cambio vegetacional, climático y ocurrencia de fuego durante los últimos 3000 años?

- Los resultados obtenidos en esta tesis indican que los patrones de fuego han sido controlados principalmente por las condiciones climáticas, observando concordancia entre eventos de fuegos locales y extralocales en las zonas bajas del área de estudio. Este régimen de fuego tuvo influencia sobre la abundancia de especies, observándose disminución de especies arbóreas en periodos de alta actividad de fuego. También es posible encontrar similitudes en la actividad de fuego entre eventos locales de fuego entre las zonas altas (800 m.s.n.m.) y bajas (47 m.s.n.m.) de la Región.

III. ¿Se observa alguna asociación estratigráficamente distinguible entre actividad volcánica (deposición de tefras) y ocurrencia de fuegos a nivel local durante los últimos 3000 años?

- Se observan asociaciones entre eventos de fuego puntuales y deposición de tefras entre 1500-3000 años cal AP, periodo donde hay baja actividad de fuego local y extralocal.

IV ¿Cuál ha sido la respuesta de la vegetación y los regímenes de fuego a perturbación por actividad volcánica y actividades humanas?

- Las respuestas de la vegetación a la depositación de tefras sugieren efectos menores sin evidencia estratigráfica de que la depositación de tefras fuera causante directo de cambios vegetacionales en los sitios de estudio.
- Durante los últimos 350 años los registros polínicos y de partículas de carbón muestran expansión de taxa asociables a perturbación como (*Poaceae*, *Rumex*, *Plantago*) y eventos locales de fuegos asociados cronológicamente con información proveniente de relatos y documentos históricos que describen la colonización europea de la Región de los Lagos.

V. ¿Existe sincronía de estas señales con las anomalías climáticas descritas a partir de registros paleoambientales desarrollados en el Hemisferio Norte que cubren los últimos 2000 años?

- La variabilidad climática multicentenal observada en los sitios de estudio puede relacionarse con la alternancia de condiciones secas/cálidas y/o frías/húmedas descritas principalmente en el Hemisferio Norte.

7. BIBLIOGRAFÍA.

Abarzúa, A. Villagrán, C & Moreno, P.I. 2004. Deglacial and postglacial climate history in east-central Isla Grande de Chiloé, southern Chile (43°S). *Quaternary Research* 62: 49-59

Abarzúa, A & Moreno, P.I. 2008. Changing fire regimes in the temperate rainforest region of southern Chile over the last 16,000 yr. *Quaternary Research* in press.

Aceituno, P., Fuenzalida, H., & Rosenbluth, B. 1993. Climate along the extratropical west coast of South America. En H. A. Mooney, E. R. Fuentes, And B. Kromberg, *Earth System Responses to Global Change* (Eds.), Academic Press, San Diego: 61–70.

Bengtsson, L. & Enell, M. 1986. Chemical analysis. En BERGLUND, E. (ed.) *Palaeoecology and Palaeohydrology*. Wiley: Chichester; cap. 2: 423–451.

Bertrand, S. Boës, X. Castiaux, J. Charlet, F. Urrutia, R. Espinoza, C. Lepoint, G. Charlier, B & Fagel, N. 2005. Temporal evolution of sediment supply in Lago Puyehue (Southern Chile) during the last 600 yr and its climatic significance. *Quaternary Research* 64 163 – 175.

Besoain, E, Peralta, M, & Massaro, S. 2000. Mineralogía y génesis de algunos suelos de cenizas volcánicas de Chiloé continental, Chile. *Agricultura Técnica* 60 (2).

Bianchi, G. & McCave, I., 1999. Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep ocean flow south of Iceland, *Nature* 397, 515.

Bradley, R., Hughes, M & Diaz, F. 2003. Climate in Medieval Time. *Science* 302:404-405

Bond, W.J. & Keeley, J.E. 2005. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution* Vol.20 No.7

Castillo, M. 2006. La acción del fuego en la zona mediterránea costera de la quinta región de Chile. *Ambiente forestal*, vol nº 12, p. 14 – 20.

Dean Wej. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology* 44: 242–248.

Denton, G.H., Lowell, T.V., Moreno, P.I., Andersen, B., & Schluchter, C. 1999. Geomorphology, stratigraphy, and radiocarbon chronology of Llanquihue Drift in the area of the southern Lake District, Seno Reloncaví, and Isla Grande de Chiloé, Chile. *Geografiska Annaler* 81A: 167–229.

Desprat, S., Sanchez Goñi, M., Loutre M.F. 2003. Revealing climatic variability of the last three millennia in northwestern Iberia using pollen influx data. *Earth and Planetary Science Letters* 213:63-78.

Dillehay, T. 1989. "Monte Verde. A Late Pleistocene Settlement in Chile. Palaeoenvironment and Site Context." Smithsonian Institution Press, Washington, DC.

Díaz, M. F & Armesto, J. J. 2007. Limitantes físicos y bióticos de la regeneración arbórea en matorrales sucesionales de la Isla Grande de Chiloé, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 80: 13-26.

Donoso, C. 1987. Variación natural en especies de *Nothofagus* en Chile. *Bosque*: 8 (2): 85-97

Elizalde, R. 1970. La Sobrevivencia de Chile, La conservación de sus recursos naturales renovables (2° edición). Servicio Agrícola y Ganadero, Ministerio de Agricultura: Cap. 1 y 2.

Esper, J, Cook, E & Schweingruber, F. 2002. Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability. *Science*: 295: 2250-2252.

Fægri & Inversen, J., 1989. Textbook of pollen analysis. John Wiley & Sons Ltd. London. United Kingdom. 327pp.

Grimm, E., 1987. CONISS: A fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers and Geosciences*. Vol. 13. 13-35.

González- Ferran, O. 1995. Volcanes de Chile. Instituto geográfico militar. 449-452

- Heusser, C. J. 1966. Late-Pleistocene pollen diagrams from the Province of Llanquihue, southern Chile. *Proceedings of the American Philosophical Society*. 110: 269–305.
- Heusser C, J. 1971. *Pollen and Spores of Chile*, The University of Arizona Press.
- Heusser, C. J. 1974. Vegetation and climate of the southern Chilean lake district during and since the last Interglaciation. *Quaternary Research*, 4: 290–315.
- Heusser C, J. 1994. Paleoindians and fire during the late quaternary in southern South America. *Revista Chilena de Historia Natural* 67: 435-442
- Heusser, C. J., Lowell, T. V., Heusser, L. E., Hauser, A., Andersen, B. G. & Denton, G. H. 1996. Full-glacial–lateglacial paleoclimate of the Southern Andes: evidence from pollen, beetle, and glacial records. *Journal of Quaternary Science*. 11(3): 173–184.
- Heusser, C. J., Heusser, L. E. & Lowell, T. V. 1999. Paleoecology of the southern Chilean Lake District- Isla Grande de Chiloé during middle-Late Llanquihue glaciation and deglaciation. *Geografiska Annaler Series A—Physical Geography* 81: 231–284.
- Higuera, P. E., Peters, M. E., Brubaker, L. B., Gavin, D.G., 2007. Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model. *Quaternary Science Reviews* 26 1790–1809
- Higuera, P. E., L. B. Brubaker, P. M. Anderson, T. A. Brown, A. T. Kennedy, and F. S. Hu. 2008. Frequent Fires in Ancient Shrub Tundra: Implications of Paleorecords for Arctic Environmental Change. *PLoS ONE* 3:e0001744.
- Hu, F.S., Ito, E., Brown, T.A., Curry, B.B. and Engstrom, D.R. 2001. Pronounced climatic variations in Alaska during the last two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 98: 10,552-10,556.
- Ihaka R. & Gentleman R. 1996. R: a language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 5: 299–314.

Ji, J. F., Shen, J., Balsam, W., Chen, J., Liu, L., Liu, X., 2005. Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai–Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 233: 61–70

Kitzberger, T., 2002. ENSO as a forewarning tool of regional fire occurrence in northern Patagonia, Argentina. *International Journal of Wildland Fire* 11, 33–39.

Kitzberger, T., Swetnam, T. W. and Veblen T. T. 2001. Inter-hemispheric synchrony of forest fires and the El Niño–Southern Oscillation. *Global Ecology & Biogeography*: 10, 315–326.

Lamy F., D. Hebbeln & G. Wefer. 1999. High resolution marine record of climatic change in mid-latitude Chile during the last 28 000 years based on terrigenous sediment parameters, *Quat. Res.* 51: 83–93.

Lamy F., D. Hebbeln, U. Röhl, & G. Wefer. 2001. Holocene rainfall variability in southern Chile: a marine record of latitudinal shifts of the Southern Westerlies. *Earth and Planetary Science Letters*. 185: 369–382

Lara, A. & Villalba, R. 1993. A 3,620-year temperature reconstruction from Fitzroya cupressoides tree rings in southern South America. *Science* 260: 1104–1106.

Le-Quesne, C., C. Villagrán y R. Villa, 1999. Historia de los bosques relictos de "olivillo" (*Aextoxicon punctatum*) y Mirtáceas de la Isla Mocha, Chile, durante el Holoceno tardío. *Revista Chilena de Historia Natural* 72:31–47.

Lloret, F. 2003. Gestión del fuego y conservación en ecosistemas mediterráneos. *Revista Ecosistemas* nº 2.

Long, C. J., Whitlock, C., Bartlein, P & Millspaugh S. 1998. A 9000-yr history from the Oregon Coastal Range based on a high-resolution charcoal study. *Canadian Journal of Forest Research* 28, 774–787.

Jones, P. D., & M. E. Mann, 2004. Climate over past millennia, *Rev. Geophys.*, 42, RG2002

Mann, M., Bradley, R. & Hughes, M. 1999. Northern Hemisphere Temperatures during the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations, *Geophysical Research Letters* 26:759–762.

Mann, M., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R., Hughes, M., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G., Ni, F. 2009. Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science* 326: 1256-1260.

Marchant, M., Hebbeln, D., And Wefer, G 1999, High resolution planktic foraminiferal record of last 13300 years from the upwelling area off Chile: *marine Geology*, v 161:115-128.

Mauquoy, D., Blaauw, M., van Geel, B., Borronei, A., Quattrocchio, M., Chambers, F.M. and Possnert, G. 2004. Late Holocene climatic changes in Tierra del Fuego based on multiproxy analyses of peat deposits. *Quaternary Research* 61: 148-158.

Mayewski, P., Rohling, E., Stager, J.C., Karlen, W., Maasch, K., Meeker, D., Meyerson, E., Gasse, F., Van Kreveld, S. Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G. Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R., Steig, E. (2004) Holocene climate variability. *Quaternary Research* 62: 243– 255.

McDermott, F., Matthey, D., Hawkesworth, C. 2001. Centennial-Scale Holocene Climate Variability Revealed by a High-Resolution Speleothem $d^{18}O$ Record from SW Ireland. *Science* 294: 1328-1331.

Millspaugh, S. & Whitlock, C. 1995. A 750 year fire history based on lake sediments records in Central Yellowstone National Park. *Holocene*. 5: 283-292.

Montecinos, A. & P. Aceituno, 2003. Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate*, 16(2), 281-296.

Moreno, P.I. 1997. Vegetation and climate change near Lago Llanquihue in the Chilean Lake District between 20,200 and 9500 14C yr B.P. *Journal of Quaternary Science* 12: 485-500.

Moreno, P. I. 2002 Cambios postglaciales en el clima, fuego y vegetación en la región templada del sur de Chile: conocimiento actual y desafíos futuros. En seminario El fuego en la Dinámica Natural de ecosistemas Forestales Templados. Valdivia, CONAF.

Moreno, P.I., 2004. Millennial-scale climate variability in northwest Patagonia during the last 15,000 yr. *Journal of Quaternary Science* 19, 35–47.

Moreno, P. & Leon, A. 2003. Abrupt vegetation changes during the last Glacial– Holocene transition in mid-latitude South America. *Journal of Quaternary Science* 18(8): 787–800.

Moreno, P.I., G.L. Jacobson, B. Andersen, T.V. Lowell, & G.H. Denton 1999. Abrupt vegetation and climate changes during the last glacial maximum and the last Termination in the Chilean Lake District: A case study from Canal de la Puntilla (41°S). *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography* 81A: 285-311.

Moreno, P.I, G.L. Jacobson, T.V. Lowell & G.H. Denton 2001. Interhemispheric climate links revealed from a late-glacial cool episode in southern Chile. *Nature* 409: 804-808.

Moy, C.M., Dunbar, R. B., Moreno, P. I., Francois, J P. Villa-Martínez, R.P., 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 1335– 1349.

Muñoz, J. & Pino, M. 2002. Sitios geológicos y poblamiento ancestral del Borde costero del Seno Reloncaví, Región de los Lagos, Chile: su importancia histórica, científica, cultural y turística. Simposio Internacional de Geología Ambiental para la Planificación del Uso del Territorio, noviembre 2002, Puerto Varas: 124-127.

Oberdorfer, E. 1960. "Pflanzensoziologische Studien in Chile," p. 208. Cramer, Weinheim

Otero, L. 2006. La huella del fuego. Pehuen editores. ISBN 956-16-0409-4

Power, M.J., Marlon, J., Ortiz, N., Bartlein, P.J., Harrison, S.P., Mayle, F.E., Ballouche, A., Bradshaw, R., Carcaillet, C., Cordova, C., Mooney, S., Moreno, P., Prentice, I.C., Thonicke, K., Tinner, W., Whitlock, C., Zhang, Y., Zhao, Y., Anderson, R.S., Beer, R., Behling, H., Briles, C., Brown, K.J., Brunelle, A., Dodson, J., Doughty, E., Edwards, M.E., Fisinger, W., Foster, D., Gaillard, M.-J., Gavin, D.G., Gobet, S., Haberle, S., Hallett, D.J., Higuera, P., Hope, G., Horn, S., Inoue, J., Kaltenrieder, P., Kennedy, L., Kong, Z.C., Larsen, C., Long, C.J., Lynch, J., Lynch, B., McGlone, M., Meeks, S., Mensing, S., Meyer, G., Minckley, T., Mohr, J., Newnham, R., Noti, R., Oswald, W., Pierce, J., Richard, P.J.H., Shuman, B.J., Takahara, H., Toney, J., Turney, C., Umbanhower, C., Vandergoes, M., Vanniére, B., Vescovi, E., Walsh, M., Wang, X., Williams, N., Wilmshurst, J., Zhang, J.H. Changes in fire activity since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data. *Climate Dynamics*: published online (doi 10.1007/s00382-007-0334-x).

Pyne, S., Andrews, P. & Laven, R. 1996. *Introduction to Wildland Fire*. New York, John Wiley and Sons, 769 pp.

Ramírez, C., 1987. El género *Nothofagus* y su importancia en Chile. *Bosque*: 8(2) 71-76

Rothhammer, F., Cocilovo, J., Llop, E. & Quevedo, S. 2000. Orígenes y microevolución de la población chilena. En Hidalgo, J., Schiappacasse, V., Niemeyer, H., Aldunate, C. & Solimano, I. (Eds) *Culturas de Chile. Prehistoria, desde sus orígenes hasta los albores de la conquista*. Editorial Andrés Bello. Cap XX: 403-414.

Sandweiss, D., Maasch, K., Buerger, R., Richardson, J. B., Rollins, H., And Clement, A. 2001. Variation in holocene El Niño frequencies: climate records and cultural consequences in ancient Peru: *Geology* v 29 (7):603-606.

Schmithüsen, J. 1960: Die Nadelhölzer in den Waldgesellschaften der südlichen Anden. *Vegetatio* 9:313-327.

Stine, S. 1994. Extreme and persistent drought in California and Patagonia during mediaeval time. *Nature* 369: 546-549

Stockmarr, J., 1971. Tablets with spores used in absolute pollen análisis. *Pollen et Spores*. Vol. XIII. N°4. 615-621.

Soon, W, Baliunas. S.; Idso C.; Idso S.; Legates D.R. 2003. Reconstructing Climatic and Environmental Changes of the Past 1000 Years: A Reappraisal. *Energy & Environment*, 14 (2-3): 233-296(64).

Tampe, E. Sj. 2003. Puerto Montt, crónicas y testimonios de 150 años, ediciones Moyra Holzapfel.

Valenzuela, M. 2007. Patrones espacio-temporales de regímenes de fuego en la Región de los Lagos durante los últimos 3000 años. Tesis para optar al título profesional de Biólogo, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.

Veblen, T. T & Schlegel F, M., 1982. Reseña Ecológica de los Bosques del Sur de Chile. *Bosque* (4) 2:73-115

Vecchi, G., Soden B., Wittenberg, A., Held, I., Leetmaa, A. & Harrison, M. 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature* Vol 441: 73-76.

Villa-Martinez R, Villagrán C, Bettina J. (2003). The Last 7500 cal yr BP of Westerly Rainfall In Central Chile Inferred From A High-Resolution Pollen Record From Laguna Aculeo (34 Degrees S). *Quaternary Research* 60(3):284-293.

Villagrán, C. 1980. Vegetationsgeschichtliche und pflanzensoziologische Untersuchungen im Vicente Perez Rosales Nationalpark (Chile). *Dissertationes Botanicae* 54, 1-165.

Villagrán, C. 1985. Análisis palinológico de los cambios vegetacionales durante el Tardiglacial y Postglacial en Chiloé. *Revista Chilena de Historia Natural*, 58: 57-69.

Villagrán, C. 1988 Late Quaternary vegetation of Southern Isla Grande de Chiloé, Chile. *Quaternary Research*, 29: 294-306.

Villagrán, C. 1988. Expansion of Magellanic moorland during the Late Pleistocene: palynological evidence from northern Isla Grande de Chiloé, Chile. *Quaternary Research*, 30: 304–314.

Villagrán, C. 1991. Desarrollo de Tundras Magallánicas durante la transición glacial–postglacial en la Cordillera de la Costa, Chiloé: Evidencias de un evento equivalente al Younger Dryas? *Bamberger Geographische Schriften Bd 11*: 245–256.

Villagrán, C. 1993. Excursion guide. En *International Workshop: The Quaternary of Chile*. Santiago, Chile.

Villalba, R. 1990. Climatic fluctuations in northern Patagonia during the last 1000 years as inferred from tree-ring records. *Quaternary Research*, 34(3): 346-360

Whitlock, C & Anderson, R. 2002. Fire History Reconstructions Based on Sediment Records from Lakes and Wetlands En: Veblen, T., Baker, W., Montenegro, G & Swetnam, T. (Eds) *Fire and Climate Change in the Americas*. Springer-Verlag, Berlin.

Whitlock, C., Bartlein, P.J., 2004. Holocene fire activity as a record of past environmental change. In: Gillespie, A., Porter, S.C. (Eds.), *Developments in Quaternary Science*, vol. 1. Elsevier, Amsterdam, pp. 479–489.

Whitlock, C & Larsen, C. 2002. Charcoal as a Fire Proxy. En: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Vol. 3 Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 75–97.

Whitlock, C., Moreno, P I. & Bartlein, P. 2007. Climatic controls of Holocene fire patterns in southern South America, *Quaternary Research* 68: 28–36.

Wright Jr, H. 1967. A square rod piston sampler for lake sediments, *Journal of Sedimentary Petrology*, 37: 975-976.

Wright, H, Mann, D & Glaser, P. 1984. Piston cores for peat and lake sediments, *Ecology*, 65: 657-659.