

Historia del clima y la vegetación de Chile central durante el holoceno: una reconstrucción basada en el análisis de polen, sedimentos, microalgas y carbón

Tesis Entregada a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al grado de Doctor en Ciencias con mención en Ecología y Biología Evolutiva

Rodrigo Patricio Villa Martínez

Septiembre, 2002

Director de Tesis: Dr. Carolina Villagrán M.

INFORME DE APROBACIÓN TESIS DE DOCTORADO .	1
..	3
AGRADECIMIENTOS .	5
RESUMEN .	7
ABSTRACT .	9
CAPITULO 1 .	11
Introducción general . .	11
Hipótesis .	13
Estructura de esta Tesis . .	17
Literatura citada .	18
CAPITULO 2 .	19
Abstract .	19
Introduction . .	20
The Study Area .	21
Materials and Methods .	22
RESULTS .	23
Pollen stratigraphy .	23
Zone LA 1 (7500-5700 cal yr B.P.) .	23
Zone LA 2 (5700-3200 cal yr B.P.) .	23
Zone LA-3 A and B (3200- 0 cal yr B.P.) . .	24
Charcoal and Microalgae Stratigraphy .	24
DISCUSSION .	24
Fire history . .	26
Regional implications .	26
Conclusions . .	27
ACKNOWLEDGEMENTS . .	27
LITERATURE CITED .	28

CAPITULO 3 .	33
Abstract .	34
Introduction . .	34
The study area . .	35
Materials and methods .	36
Results . .	36
Pollen Stratigraphy .	36
Microalgae and Charcoal Stratigraphy .	37
DISCUSSION .	38
Acknowledgements .	39
Literature Cited .	40
CAPITULO 4 .	47
Resumen .	47
Abstract .	48
Introducción .	48
Área de estudio . .	49
Materiales y Métodos .	50
Resultados . .	51
Estratigrafía Polínica . .	51
Estratigrafía de microalgas y carbón . .	52
DISCUSIÓN .	53
Agradecimientos . .	55
Literatura citada .	55
CAPITULO 5. DISCUSIÓN GENERAL .	61
LITERATURA CITADA . .	64

INFORME DE APROBACIÓN TESIS DE DOCTORADO

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

RODRIGO PATRICIO VILLA MARTÍNEZ

Ha sido aprobada por la Comisión de Evaluación de la tesis como requisito para optar al grado de Doctor en Ciencias con mención en Ecología y Biología Evolutiva, en el examen de Defensa de Tesis rendido el día 6 de septiembre de 2002

Director de Tesis: Firma

Dr. Carolina Villagrán M. _____

Comisión de Evaluación de Tesis

Dr. Patricio Aceituno _____

Dra. Mary Kalin Arroyo _____

Dr. Pablo Marquet _____

Dr. Alejandro Troncoso _____

A mis padres y hermanas A mi esposa e hijos A la memoria de mí querido hermano Miguel

AGRADECIMIENTOS

Mis más profundos sentimientos de gratitud a Carolina Villagrán M., tutora de mis tesis de Magíster y de Doctorado, por su valiosa contribución en mi formación como científico, su enseñanza de la vegetación chilena y sobre todo por su generosa amistad durante tantos años. Agradezco a los revisores Dres. Patricio Aceituno, Mary Kalin-Arroyo, Pablo Marquet y Alejandro Troncoso, quienes con acertados comentarios y sugerencias enriquecieron la versión final de esta tesis

Mis agradecimientos también a mis amigos Felipe Hinojosa, Patricio Moreno, Claudio Latorre, Juan Carlos Aravena, Antonio Maldonado, Ana Abarzúa, Eugenia Gayó y Ana León, todos integrantes del Laboratorio de Palinología, que con esmero han forjado un grato ambiente de trabajo y discusión. Especial reconocimiento merece Claudio Latorre y Patricio Moreno (cotutor de esta tesis) por su compañerismo y fructíferas discusiones en torno al paleoclima cuaternario de Chile, que contribuyeron a mejorar el trabajo de esta tesis. Van mis agradecimientos a mis amigos y compañeros de Botánica: Martín Carmona, Paulina Chacón, Francisca Díaz, Claudia Hernández, Alejandro Muñoz, Claudia Papic, Denise Rougier y a “la” Wally.

Mis agradecimientos a I. Vila y V. Montecino por su ayuda con el reconocimiento e interpretación de los registros de microalgas. Willi Tanner, Blas Valero, Marc Begert y Martin Grosjean participaron en los trabajos de extracción de sedimentos. A Felipe Hinojosa, Antonio Maldonado, Patricio Moreno y Giovanni Araya por su valiosa colaboración en los trabajos de muestreo de la vegetación en el cerro Cantillana.

Finalmente, mis agradecimientos a CONICYT por otorgarme la beca doctoral y el financiamiento del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnología, proyecto doctoral # 2990012. Al Centro de Estudios del Cuaternario (CEQUA), Universidad de Magallanes, Punta Arenas, por su financiamiento durante la etapa de redacción.

Los fechados radiocarbónicos (AMS) fueron subsidiados por National Science Foundation (ATM-9809285) a la Universidad de Colorado (USA)-INSTARR Laboratorio fechados Radiocarbónicos (AMS). Los trabajos de barrenaje y extracción de sedimentos de Laguna de Aculeo y Laguna Matanzas fueron parcialmente subsidiados por el Fondo Nacional de Ciencia de Suiza (N° 20.56908.99 al Dr. Heinz Veit). Agradezco, además, la colaboración de Peter Appleby (fechados ^{210}Pb) y Mebus Geyh (fechados ^{14}C). A Myriam Pastene, de la Clínica Bellolio, por las facilidades y ayuda en la obtención de placas radiográficas de los sedimentos.

RESUMEN

El carácter de transición climática que posee la zona de Chile central-norte (30-34°S), junto a la influencia del sistema El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la constituyen en una zona de alta sensibilidad y, por ello, clave para el registro de los cambios climáticos ocurridos en el pasado. Paradojalmente, es una de las áreas del país menos estudiada y escasamente comprendida en lo que se refiere a su paleoclima y paleovegetación. Los pocos registros paleoecológicos disponibles sugieren que el clima del Holoceno (últimos 11500 años) de Chile central estuvo marcado por una extremada variabilidad, con alternancia de fases húmedas y cálidas/secas.

La alternancia de estas fases climáticas ha sido explicada por cambios latitudinales del cinturón de vientos del oeste. Alternativamente, las fases húmedas podrían ser producto de cambios en la intensidad de la circulación al interior del área dominada por los vientos del oeste (condición tipo ENOS).

En este estudio contribuimos a discriminar entre estos dos escenarios climáticos, sobre la base del examen de dos columnas de sedimentos, continuos y de alta resolución, obtenida en dos cuencas lacustres cerradas situadas en torno a la latitud 34° S, una en la ladera oriental de la Cordillera de la Costa (Laguna Aculeo) y otra en la costa de Chile central (Laguna Matanzas). Con el fin de establecer cambios climáticos y vegetacionales, en ambos registros se analizaron indicadores independientes: polen fósil, microalgas, carbón y sedimentos. Ambos registros cuentan con una cronología robusta, basada en numerosos fechados radiocarbónicos, la que permite determinar con precisión los momentos en que ocurren los principales cambios del clima durante los últimos 7500 años calendario.

Los resultados del análisis de los distintos indicadores permite inferir la siguiente cronología de eventos en Chile central: 1) Entre 7500 y 5700 años A.P., los altos valores de frecuencia de Chenopodiaceae, las trazas de polen arbóreo, la ausencia de microalgas y la depositación de limos arenosos, sugieren predominio de condiciones cálidas y secas, debido al desplazamiento hacia el sur de los vientos del oeste. La ausencia de palinomorfos antes de 7500 años cal A.P., sugiere que las condiciones cálidas y secas comenzaron desde el inicio del Holoceno. 2) Entre 5700 y 3200 años A.P., el aumento de Gramineae, la riqueza de taxa herbáceos y arbóreos, la depositación de limos y el registro de microalgas oligo-mesotróficas, indican incremento de las precipitaciones, probablemente en respuesta a una mayor influencia de los vientos del oeste. 3) Durante los últimos 3200 años cal A.P., el incremento de Gramineae, de los taxa arbóreos, la variabilidad de los sedimentos, y las marcadas fluctuaciones en las frecuencias y tasa de acumulación de polen y microalgas, implican predominio de condiciones climáticas más húmedas que en los periodos precedentes, aunque marcada por una fuerte variabilidad de las precipitaciones. Esta variabilidad es atribuida a una mayor frecuencia e intensidad de eventos ENOS. 4) durante los últimos 100 años, ambos registros muestran una creciente transformación del paisaje vegetal debido a una fuerte presión antropogénica.

Los resultados concuerdan con la evidencia palinológica y sedimentológica documentadas para el Holoceno del sur de Chile. Así, la fase árida del Holoceno temprano a medio, coincide cronológicamente con la expansión del bosque valdiviano en esta región, evento que también ha sido interpretado como una respuesta a un desplazamiento hacia el sur de los vientos del oeste. Por otra parte, las fases húmedas, interpretadas en este estudio como la expresión de un incremento progresivo de la influencia de los vientos del oeste a partir de 5700 años cal A.P., son coherentes con el predominio de espectros de bosque Nordpatagónico en el sur de Chile en torno

a esta fecha. Desde 3200 años cal A.P., los eventos ENOS, parecen haber incrementado su frecuencia e intensidad, como lo sugiere el incremento de la variabilidad de las lluvias, inferidos de las fuertes fluctuaciones de los distintos indicadores que marcan el lapso.

ABSTRACT

The transitional climate character of north-central Chile (30-34°S) and the influence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO), makes this a key region for monitoring past climatic changes. It is also one of the most poorly known areas in terms of paleoclimate and paleovegetation. Scarce paleoenvironmental records present suggest that during the Holocene (last 11500 cal years) the climate of central Chile was marked by extraordinary variability, with alternating dry and humid phases.

The occurrence of these climatic phases has been explained by latitudinal changes of the southern westerlies. Moreover, the humid phases could occur by changes in the intensity of the circulation inside the area dominated by the westerlies (ENSO conditions).

In this thesis, I address this issue by studying two continuous high resolution sediments records obtained from lacustrine-closed basins from 34° S, in the eastern slope of the Cordillera de la Costa (Laguna Aculeo) and coast of central Chile (Laguna Matanzas). To determine vegetational and climatic changes in these records, I analyze several independent proxies, such as fossil pollen, microalgae, charcoal and sediments. Both records have good chronologic control, based on numerous radiocarbon dates, that precisely detail the moments in which climatic changes have occurred over the last 7500 calendar years.

The results of the distinct proxy analysed are used to infer the following sequence of events for central Chile: 1) between 7500-5700 cal yr B.P., the high frequency values of Chenopodiaceae, trazes of arboreal pollen, the lack of microalgae and sand-silty sediments, suggest warm and dry conditions, probably caused by the increased influence of South Pacific Anticyclone and southwardly displaced westerlies. During the early Holocene, before 7500 cal yr B.P., the lack of palynomorphs in the sediments suggests warm and dry conditions. 2) Between 5700 and 3200 cal yr B.P., the increase of Gramineae, the arboreal and herbaceous diversity, the occurrence of oligo-mesotrophic microalgae and lacustrine silt, indicate increases in precipitation, caused by increased westerly influence. 3) During the last 3200 cal yr, the increase of Gramineae and arboreal taxa, the sediments variability, and the strong fluctuations in the pollen and microalgae frequency and accumulation rate, suggest humid climate conditions, marked by a strong variability in precipitation. This variability could be related to an increased frequency and intensity of ENSO events. 4) During the last century, both records show a advanced degree of landscape transformation caused by increased human activity.

These results are consistent with Holocene palinological and sedimentological evidence from southern Chile. The early to middle Holocene arid phase coincides chronologically with expansion of valdivian forest in this region. This event has been interpreted as a answer to southward displacement of the westerlies. On the other hand, the Holocene humid phases, interpreted in this study as the expression of a progressive increment of westerly influence over this area starting at 5700 cal yr B.P., it is coherent with prevalence of nordpatagonic forest in the south of Chile around this date. From 3200 cal yr B.P. onward, the ENSO events seem to have increased in frequency and intensity, as suggest by increased rainfall variability, inferred from strong fluctuations of all proxies over this time.

CAPITULO 1

Introducción general

Uno de los acontecimientos más relevantes en la literatura paleoclimática durante la última década, ha sido el reconocimiento de la complejidad climática del Holoceno, con ocurrencia de abruptos cambios climáticos globales registrados a escala de tiempo milenial . De acuerdo a , estos eventos del Holoceno corresponden a manifestaciones de un ciclo climático dominante de escala de tiempo milenial, el cual es independiente del mecanismo responsable del cambio climático glacial-interglacial. Los mecanismos causales de estas variaciones no son claros y se ha tratado de explicar por cambios en la circulación termohalina del Atlántico norte (Bond et al. 1997, Bianchi & Mc Cave 1999)

Durante los últimos años se ha postulado otra hipótesis que propone que, desde el Pacífico tropical, se podrían generar cambios climáticos globales a escala milenial . Básicamente, esta hipótesis sugiere que interacciones no lineales entre el océano y la atmósfera en el Pacífico tropical pueden generar cambios en la distribución de las temperaturas superficiales del mar y la posición de la convección atmosférica, de manera análoga a lo que ocurre en la actualidad durante los eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), alterándose así el clima global a través de teleconexiones atmosféricas .

Sin embargo, esta hipótesis ha surgido de modelos de circulación general y aún falta

información paleoecológica proveniente de latitudes tropicales y subtropicales que permitan su prueba empírica, en particular de aquellas zonas que presentan actualmente teleconexiones con ENOS.

El borde norte de la región mediterránea de Chile (30-34°S) es un área clave, por su elevada sensibilidad, para el registro de cambios climáticos del pasado. En efecto, corresponde a la zona de transición entre los dos grandes sistemas responsables del clima de la costa Pacífica de Sudamérica, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y el Cinturón de Vientos del Oeste (CVW), y presenta además claras teleconexiones con el fenómeno El Niño. El clima mediterráneo de Chile central (30-38°S) está determinado principalmente por la influencia del APS. En invierno, el APS se desplaza hacia el norte de su posición promedio (30°S), posibilitando así la actividad frontal asociada al CVW en Chile central. En contraste, durante el verano el APS se debilita y desplaza hacia el sur, dominando condiciones cálidas y secas en esta misma región. Es frecuente, en el borde mediterráneo norte (30-34°S), la ocurrencia de sequías invernales episódicas. Anomalías en la intensidad del APS y en la precipitación en Chile central están estrechamente relacionadas a las fluctuaciones del índice de la Oscilación del Sur (OS). Durante las fases negativas de OS (eventos El Niño), la presión atmosférica es anormalmente baja en el ámbito del APS posibilitando una mayor frecuencia de los frentes de mal tiempo. Durante las fases positivas de OS (eventos La Niña), el APS se encuentra vigorizado, predominando condiciones frías y secas.

Adicionalmente, Chile central es una zona de extraordinario valor biogeográfico por la confluencia de elementos de origen neotropical, subtropical y subantárticos, consecuencia de las sucesivas migraciones que la han afectado durante el Terciario y Cuaternario. Además es la de mayor densidad poblacional e impacto antrópico del país, de manera que la discriminación entre la variabilidad climática y vegetacional natural y la inducida por el hombre es esencial para la planificación del desarrollo y elaboración de las políticas de conservación. Paradojalmente, esta zona es una de las menos estudiadas, desde el punto de vista paleoclimático, en Chile. Así por ejemplo, para el Holoceno (últimos 11500 años calendario), el periodo geológico en que vivimos, aún no se cuenta con una cronología regional ni con un marco conceptual que integre y explique causalmente la variabilidad climática, documentados por los escasos y heterogéneos registros paleoambientales estudiados.

Evidencias de paleosuelos del Norte Chico (27°-33°S) durante el Holoceno registran una alternancia de fases húmedas y fases secas. Veit propuso que esta alternancia era causada por cambios latitudinales (norte/sur) del cinturón de vientos del oeste. Alternativamente, las fases húmedas podrían ser producto de cambios en la intensidad de la circulación al interior de la zona dominada por el CVW, de manera análoga a lo que ocurre durante eventos ENOS. En la Fig. 1.1, se muestra la cronología de fases húmedas/secas y de eventos ENOS propuesta por Veit (1995, 1996) para el Norte Chico.

Varios registros palinológicos provenientes de la costa de Chile central han proporcionado evidencias acerca de los cambios del clima y la vegetación durante los últimos 6000 años cal. Así por ejemplo, el registro Quintero II (32°47'S, muestra condiciones áridas entre 5700 y 4600 años cal A.P., seguido por un periodo de aumento progresivo de la humedad a partir de 4600 años cal. A.P., y el establecimiento del clima

actual durante los últimos 2000 años cal. El registro Ñague III (31°53 S, , muestra fases húmedas y secas durante los últimos 6000 años cal. Las fases húmedas ocurrieron entre 4200-3200 y los últimos 1300 años cal. Lapsos de mayor aridez ocurrieron entre 6100-4200 y 1800-1300 años cal A.P. El perfil Quereo , situado a la misma latitud que Ñague, muestra condiciones de mayor humedad solamente después de 3200 años cal A.P.

En lo que se refiere al Valle Longitudinal, existe solo un registro palinológico que abarca el Holoceno, Laguna Tagua Tagua (34°30 S, . Este registro también exhibe una serie de fases secas y húmedas durante el Holoceno. El autor interpreta el aumento de las proporciones de polen de Gramíneas, entre 10200- 6700 años cal A.P. y durante los últimos 2750 años, como indicación de aumento de la humedad; por el contrario, la dominancia de Chenopodiaceae durante los lapsos intermedios es interpretada como indicación de sequedad.

Como se ha expuesto, los escasos y misceláneos registros paleoambientales disponibles para Chile central son congruentes con la idea de extremada variabilidad que caracterizó al Holoceno. Sin embargo, los cambios no han sido explicados causalmente, ni tampoco integrados en una cronología coherentemente fechada. En esta tesis se aborda el problema enunciado por Veit (1996), relativo a los mecanismos causales de los cambios climáticos ocurridos durante el Holoceno. Se aborda, en esta tesis, la siguiente pregunta: ¿Las fases húmedas y secas del Holoceno en Chile central, fueron causadas por desplazamientos latitudinales del CVW o por cambios en la intensidad de la circulación al interior de la zona dominada por el CVW, esto es, variabilidad de las precipitaciones de manera análoga a lo que ocurre durante eventos ENOS?.

El objetivo esta tesis es: Proponer mecanismos causales de las fases climáticas registradas durante el Holoceno medio y tardío en Chile central-norte (~34°S), basado en una cronología de los cambios vegetacionales y de otros indicadores paleoclimáticos.

Hipótesis

Basado en el registro de paleosuelos del Norte Chico, Veit (1996) ha propuesto una alternancia de fases húmedas y secas durante el Holoceno. Este autor ha sugerido dos hipótesis explicativas o mecanismos causales para explicar la ocurrencia de estas fases: 1) desplazamiento latitudinal del cinturón de vientos del oeste, y 2) cambios en la intensidad de la circulación al interior de la zona dominada por el cinturón de vientos del oeste, de manera análoga a lo que ocurre durante eventos ENOS. Esta segunda alternativa implica mayor variabilidad de las precipitaciones respecto de la primera proposición. En esta tesis se espera discriminar entre estas dos hipótesis explicativas, a través del estudio de distintos indicadores paleoambientales (polen, sedimentos, microalgas y micropartículas carbón) en dos columnas de sedimentos de sistemas lacustres provenientes de Laguna Aculeo (ladera oriental de la Cordillera de la Costa) y Laguna Matanzas (litoral).

Las hipótesis acerca de la historia climática del Holoceno en Chile central-norte se fundamentan a continuación, de acuerdo al comportamiento inferido de los distintos indicadores con respecto a los dos escenarios climáticos propuestos por Veit (1996). La interpretación del valor indicador de los registros de polen fósil estará basada en la relación entre la vegetación y la lluvia de polen actual (análogos modernos), si es posible, en cada uno de los sitios de estudio. En el caso de microalgas, la interpretación se basará en los patrones de distribución actual documentados en la literatura.

En lo que se refiere a los indicadores palinológicos, periodos de aridez podrían ser inferidos en los registros de polen fósil a través del predominio de indicadores polínicos del bosque esclerófilo calidófilo y/o resistentes a la sequía (*Lithrea caustica*, *Quillaja saponaria*), y taxa polínicos herbáceos, indicadores de altas tasas de evaporación (Chenopodiaceae). En contraste, periodos de mayor humedad podrían expresarse a través del predominio de indicadores más higrófilos en los registros palinológicos. Registros de polen fósil de la costa de Chile central, han mostrado que el incremento de vegetación semiacuática y palustre (*Typha*, Cyperaceae) se corresponde con lapsos de aumento en la humedad. Asimismo, el auge de vegetación de bosque pantanoso (Myrtaceae, *Escallonia*, *Drimys winteri*) en Quintero (32°47'S, Villa-Martínez & Villagrán 1997) es interpretado como aumento en la humedad. En relación con los indicadores polínicos para el registro de la ladera oriental de la Cordillera de la Costa (LOCC), se esperaría un predominio de elementos más méxicos del bosque esclerófilo (vgr. *Persea*, *Beilschmiedia*, *Peumus*, *Maytenus*, *Azara*, *Escallonia*, etc.). Sin embargo, uno de los principales problemas, en la zona mediterránea, es la baja representación, en registros de polen fósil, de elementos arbóreos del bosque esclerófilo pertenecientes a Lauraceae y Monimiaceae. Esta situación se debe a que estas familias tienen granos de polen con paredes delgadas, las cuales no se preservan en los sedimentos o bien no soportan el tratamiento físico-químico de las muestras; por otro lado, la mayoría de las especies del bosque esclerófilo tienen una baja producción de polen debido a su polinización entomófila. De todas formas, esperamos que algunos de los elementos arbóreos más higrófilos de este bosque, con paredes del grano de polen más gruesa (vgr. *Maytenus*, *Azara*, *Escallonia*), se expresen en los registros. Considerando el problema de baja representatividad del bosque esclerófilo y basándose en el registro de Laguna Tagua-Tagua (34°30'S), Heusser (1990) propuso que el predominio del polen de Gramineae podría indicar condiciones más húmedas, mientras el predominio de Chenopodiaceae sugeriría condiciones áridas.

Utilizando estos indicadores polínicos, un predominio de flora semiacuática, palustre y/o de bosque pantanoso en el registro polínico de la costa y un predominio de Gramineae (*sensu* Heusser) y/o elementos esclerófilos más méxicos, en el registro de LOCC, sería indicativo de una expansión hacia el norte de CVW. El predominio de indicadores esclerófilos áridos e indicadores de altas tasas de evaporación como las Chenopodiaceae caracterizarán desplazamientos del CVW en sentido contrario.

Para los lapsos húmedos dominados por un régimen del tipo ENOS, con marcada variabilidad en las precipitaciones, se espera que en los registros de polen fósil se exprese esta variabilidad a través de fluctuaciones en las frecuencias polínicas. Por otro lado, la variabilidad en las precipitaciones debiera afectar el volumen de agua del lago.

Bajo una condición de espejos de agua fluctuantes, es esperable una proliferación de taxa halófitos o indicadores de evaporación (*Chenopodiaceae*, *Frankenia*), que debiera expresarse en los registros de polen. Una elevada variabilidad en las frecuencias polínicas y/o incremento de taxa indicadores evaporación (*Chenopodiaceae*) indicarían una marcada variabilidad en las precipitaciones.

Otro indicador importante de cambios climáticos, y posibles mecanismos subyacentes, son los sedimentos lacustres. En general, el balance hidrológico en una cuenca lacustre esta regulado por la evaporación y precipitación . En condiciones de mayor aridez este balance es negativo y aumenta la precipitación de sales en los sedimentos debido al aumento de la evaporación (vgr. gypsum, halita). En condiciones de mayor precipitación, este balance es positivo y determina un aumento en los niveles lacustres. Bajo esta condición, en el centro del lago se depositan sedimentos finos (limo, gyttja) debido al alejamiento de los bordes. Cambios latitudinales del CVW debieran expresar estas dos condiciones. Para condiciones de mayor humedad, debido al desplazamiento hacia el norte del CVW, se espera un balance hidrológico positivo, con aumento de los niveles lacustres y predominio de sedimentos finos (limo, gyttja). Para condiciones áridas, provocadas por desplazamiento hacia el sur del CVW, se espera el escenario opuesto. Por otra parte, en condiciones de una elevada variabilidad de las precipitaciones (vgr. ENOS) el balance hidrológico en el lago debiera ser variable y la sedimentología característica. La ocurrencia de lluvias fuertes genera un aumento en la erosión en laderas y playas del lago, aumentando el flujo de sedimentos al interior de un lago, a través de las quebradas y/o ríos, cambiando los regímenes de sedimentación en cortos periodos de tiempo . Un aumento repentino y rápido del flujo de sedimentos podría provocar: a) que sedimentos más gruesos se depositen en el centro del lago, b) erosión y redepositación de sedimentos lacustres más antiguos al interior del lago (intraconglomerados) y c) flujos turbidícticos que corresponden a un influjo repentino de sedimentos al interior de un lago . Luego, se espera que, en un régimen de elevada variabilidad, los sedimentos muestren episodios de sedimentación con sedimentos más gruesos, intraconglomerados o turbiditas.

Por otra parte, el aumento de niveles lacustres implica un descenso de la salinidad y nutrientes en un lago, procesos que afectarían las poblaciones de microalgas. Bajo contenido de microalgas (frecuencias, tasa de acumulación) en general, y/o microalgas indicadores de baja concentración de nutrientes y/o salinidad en particular, es esperable en condiciones de un aumento sostenido de la humedad, como sucedería por ejemplo con el CVW desplazados hacia el norte. De acuerdo a la distribución de microalgas en la Región de los Lagos y Chile central , *Pediastrum boryanum* y *P. duplex* son indicadores de condiciones de baja salinidad y/o contenido de nutrientes (condiciones oligotróficas a mesotróficas). *Pediastrum simplex* y *Scenedesmus sp.*, entre otros, indican alto contenido de nutrientes (condiciones eutróficas). Por otra parte, se espera que, en condiciones de elevada variabilidad de las precipitaciones, con fluctuaciones en niveles lacustres, sean afectadas las poblaciones de microalgas y este hecho se exprese en el registro como fluctuaciones en las frecuencias y/o tasas de acumulación.

Finalmente, consideramos también el contenido de carbón en el registro como indicador paleoclimático. En la actualidad, la ocurrencia de fuegos en Chile central esta

asociado a actividad humana y poco se conoce acerca del impacto de tormentas eléctricas en la generación de fuego. La estacionalidad de la zona Mediterránea influye fuertemente la distribución del fuego. Altas frecuencias de fuego ocurren durante el verano, mientras que durante los meses invernales el riesgo de fuego se reduce a cero. En paleoecología, se han utilizado las partículas de carbón microscópico para inferir la historia del fuego en un área en particular. En nuestro caso particular, se espera un predominio de bajas frecuencias de micropartículas de carbón durante lapsos húmedos. En condiciones de mayor variabilidad de las precipitaciones, se espera un aumento y/o fluctuaciones en las frecuencias de carbón.

Adicionalmente, los antecedentes paleoclimáticos, disponibles en la literatura, debieran mostrar correlaciones con los mecanismos inferidos. Así, por ejemplo, lapsos en que se infiere una elevada variabilidad, asociada a un régimen ENOS, debieran corresponderse con la cronología y dirección del cambio en registros paleoecológicos provenientes de regiones en la cuenca del Pacífico Sur, que actualmente están influenciados por ENOS (vgr. costa peruana, Pacífico tropical). De la misma manera, lapsos en que se infieren desplazamientos del CVW, debieran corresponderse con la cronología y dirección de los cambios inferidos en registros paleoecológicos provenientes del sur de Chile, regidos por este sistema.

Considerando las evidencias provenientes de las distintas fuentes, discutidas en los párrafos anteriores, se integrarán los resultados sobre la base de la siguiente hipótesis:

1) Si la alternancia de fases climáticas establecidas por Veit (1996), para el Holoceno de Chile central, se produjeron por desplazamientos del CVW, se esperaría que:

1.1) Desplazamiento hacia el norte del CVW

a. Predominen de formaciones higrófilas en los registros de polen. En el caso de la vegetación costera, se esperaría flora vascular semi-acuática (e.g. *Typha*), palustres (e.g. Cyperaceae) o de bosques pantanosos (e.g. Myrtaceae). En el caso de la vegetación de LOCC, se esperaría predominio de Gramíneas y/o de taxa méxicos del bosque esclerófilo (e.g. *Maytenus*, *Escallonia*, *Azara*).

b. Predominen conjuntos de microalgas indicadores de condiciones de oligotrofia asociados a fases lacustres más estables.

c. Predominen sedimentos de grano fino del tipo limos o gyttja.

1.2) Desplazamiento hacia el sur del CVW

d. En los espectros polínicos predominen espectros vegetacionales esclerófilos áridos (e.g. *Lithrea*, *Quillaja*) e indicadores de altas tasa de evaporación como las Chenopodiaceae.

e. No se registre microalgas

f. Predominen sedimentos indicadores de evaporación (gypsum, halita).

En ambos casos, la magnitud y dirección de los cambios vegetacionales de la costa y LOCC de Chile central-norte debieran correlacionarse positivamente con los registros paleoecológicos del sur de Chile, región afectada por el régimen del CVW.

2) Si las fases húmedas establecidas por Veit (1996), para el Holoceno de Chile

central, se produjeron por cambios en la intensidad de los vientos del oeste, asociados a un debilitamiento del APS (como sucede durante los eventos ENOS), se esperaría que:

a. Los registros de polen muestren fluctuaciones en las proporciones de polen, con dominio de indicadores de altas tasas de evaporación.

b. El registro de microalgas muestre una elevada variabilidad, debido a las esperadas fluctuaciones lacustres.

c. Predominen sedimentos de grano grueso o indicadores de flujos repentinos de sedimentos en las columnas estratigráficas (e.g. turbiditas, intraconglomerados).

d. Las frecuencias de carbón en los registros en LOCC, muestren ascensos durante el tiempo propuestos para estas fases.

La magnitud y dirección de los cambios vegetacionales muestren correlación con registros paleoecológicos provenientes de regiones de Sudamérica bajo la influencia ENOS.

Estructura de esta Tesis

En los capítulos siguientes (2, 3 y 4) se describen los métodos, resultados, discusión y conclusiones de esta tesis. Estos capítulos corresponden a manuscritos que fueron preparados para su envío a revistas especializadas (The Holocene y Quaternary Research) y de circulación nacional (Revista Chilena de Historia Natural). Al final, capítulo 5, se integran los resultados en una discusión general.

El capítulo dos corresponde al manuscrito titulado “The last 7500 cal yr B.P. of westerly rainfall activity in Central Chile inferred from a high resolution pollen record from Laguna de Aculeo (lat. 34°S)”, escrito en coautoría con Carolina Villagrán y Bettina Jenny (Universidad de Berna). Este manuscrito fue elaborado para la revista Quaternary Research. En este capítulo se intenta establecer una cronología de cambios paleoclimáticos para el Holoceno de la ladera oriental de la Cordillera de la Costa. Se intenta responder a la pregunta acerca de si las fases húmedas durante el Holoceno fueron el resultado de cambios latitudinales de los vientos del oeste y/o una mayor frecuencia/intensidad de eventos ENOS. El registro de Laguna de Aculeo constituye el primer registro continental de Chile que aporta evidencias concretas de la posible influencia de actividad ENOS en el intervalo de tiempo crítico en que se ha desarrollado la discusión, el inicio y evolución del fenómeno ENOS. Además, se precisa el termino de la fase cálida del Holoceno medio en torno a los 5700 años cal A.P., unos 2700 años antes de lo que había sido sugerido en otros registros palinológicos (Heusser 1990, Villagrán & Varela 1990). Se acepta la hipótesis de desplazamiento del cinturón de vientos del oeste para explicar los cambios registrados en el Holoceno temprano a medio.

El capítulo tres corresponde al manuscrito titulado “Pollen evidence for late Holocene climate variability at Laguna de Aculeo, Central Chile (lat. 34° S)”, escrito en coautoría con Carolina Villagrán y Betina Jenny. Este manuscrito fue aceptado por la revista The

Holoceno. En este capítulo se trata la variabilidad climática durante los últimos 2500 años cal en el Valle Longitudinal de Chile central. Se plantean las siguientes preguntas: ¿la fase húmeda del Holoceno tardío fue un periodo homogéneo o variable? ¿El clima durante este lapso fue influenciado por ENOS?. Estas dos preguntas son fundamentales para comprender el actual patrón climático de Chile central. El trabajo documenta por primera vez, en un registro palinológico, que el clima de los últimos 2500 años fue húmedo y caracterizado por una notable variabilidad en las precipitaciones. Asimismo, se aportan pruebas concretas de la influencia de El Niño en el clima de Chile central, en este lapso. Por otro lado, este registro permite documentar de manera precisa el momento en que comienza la transformación del paisaje, debido a los efectos de la presión antropogénica.

El capítulo cuatro corresponde al manuscrito titulado “Variabilidad climática durante el Holoceno tardío en la costa de Chile central: evidencias palinológicas de Laguna Matanzas (Reserva Nacional El Yali, 33°46’S)”, escrito en coautoría con Bettina Jenny, Mebus Geyh (Universidad de Berna) y Carolina Villagrán. Este trabajo ha sido preparado para la Revista Chilena de Historia Natural. En este manuscrito se busca, básicamente, replicar los resultados obtenidos en Laguna de Aculeo, durante el Holoceno tardío, en un registro de la costa situado a la misma latitud. El registro permite corroborar la idea de que ENOS ha estado influenciando el clima de la región durante el Holoceno tardío. Así, se concluye que la elevada variabilidad de las precipitaciones, durante este lapso, fue de carácter regional en Chile central e independiente de las dinámicas geomorfológicas propias de cada sitio de estudio

Literatura citada

CAPITULO 2

The last 7500 cal yr B.P. of westerly rainfall in Central Chile inferred from a high resolution pollen record from Laguna Aculeo (34°S)

Rodrigo Villa-Martínez^{1*}, Carolina Villagrán¹ & Bettina Jenny²

(1) Laboratorio de Palinología, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Casilla 653, Santiago, Chile. * rvillama@icaro.dic.uchile.cl

(2) Institute of Geography, University of Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern, Switzerland.

Abstract

Here we report multiproxy analyses of a sediment core obtained from the center of Laguna Aculeo that spans the last 7500 years. Laguna Aculeo (33°50'S, 70°55'W) is one of the few natural inland lakes located in the Mediterranean zone of Central Chile, near the northern margin of regular influence of the southern westerly winds. Elevated counts of halophytes and desiccation of the lake basin prior to 5700 cal yr B.P. indicates severe aridity, and warmer-than-present conditions. This was followed by the establishment of a fresh water lake, along with an increase in arboreal and herbaceous diversity between 5700-3200 cal yr B.P. An intensification of this trend started at 3200 cal yr B.P., along with

the virtual disappearance of halophytes until 100 cal yr B.P. Within this humid period, pollen accumulation rates show large-amplitude fluctuations, contemporaneous with numerous turbidite layers, suggesting a highly variable and torrential rainfall pattern. This intense and variable westerly activity is probably associated with large amplitude fluctuations in the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Paleovegetation and paleolimnological changes starting at 100 cal yr B.P. correlate with documented human activities surrounding the lake.

Keywords: mid-Holocene, westerlies, paleo-ENSO, central Chile, Laguna Aculeo, climate change

Introduction

A growing number of studies have shown that the Holocene has been a time of complex and rapid climate changes at multiple time scales. In the context of multi-millennial climate variability, several authors have shown that the middle Holocene (8000-3000 cal yr B.P.) was a time of high climate variability). The development of high-resolution paleoclimate records has thus become indispensable for understanding the geographic extent and phasing of millennial-scale climate variability, and the mechanisms involved in their origin and propagation. These records are the only means by which mid-Holocene climate simulations as generated by General Circulation Models can be assessed, and allows to test recent hypotheses that have proposed a mechanism akin to the El Niño/Southern Oscillation (ENSO) as a generator of climate change at millennial timescales in the Pacific basin

North-central Chile (30°-34°S) is a target region to monitor past changes in the westerly winds, thanks to its transitional position between semiarid and mediterranean climate regimes in the subtropical region of western South America. Few studies in this region have addressed in detail the timing, magnitude, and range of natural climate and vegetation variability throughout the Holocene.

Climate in this region is characterized by a summer-dry/winter-wet regime, brought in by changes in the position of the South Pacific Anticyclone (SPA). During summer months, the SPA migrates south and blocks northward incursions of westerly storm tracks. Conversely, during winter months the SPA shifts northward allowing penetration of westerly fronts. Large seasonal and interannual variations in winter precipitation are commonplace in this region, in part caused by the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomenon. Pressure anomalies associated with the negative (warm) ENSO phases, which allow a northward shift of westerly storms, cause higher-than-average annual precipitation in Central Chile. Positive (cold) ENSO phases reinforce the SPA, effectively blocking the westerlies and producing cold and dry conditions in this region. This high climate sensitivity renders Central Chile as one of the key areas to monitor past variations of the westerly circulation belt and associated ENSO activity at subtropical latitudes.

Despite its transitional position, the paleoclimate of Central Chile (30°-34°S) is still

poorly understood, and high-resolution, continuous paleoclimate records are mostly lacking. The few Holocene paleoclimatic records that exist for central Chile document important climatic fluctuations, in the form of alternating wet and dry phases. Overall agreement is evident among these records regarding the occurrence of a dry and/or warm phase during the early and middle Holocene ; . The low chronology and temporal resolution in most of these records, however, impede further precision regarding the timing and structure of these phases.

We previously reported the sedimentological and geochemical data and pollen data from a short core that spanned the last 2000 cal yr B.P. from Laguna Aculeo (33°50'S, 70°55'W). In those studies we indicated that a generally wet and variable climate was present during the late Holocene at Laguna Aculeo. Here we present high-resolution pollen, charcoal and microalgae records from a longer core (482 cm) obtained at Laguna Aculeo that spans the last 7500 cal yr B.P., and discuss their regional and continental implications.

The Study Area

Located 50 km SE of Santiago, Laguna Aculeo (33°50'S; 70°54'W, 350 m.a.s.l.) lies among the inland foothills of Cordillera de la Costa within the Valle Longitudinal of Central Chile (Fig. 2.1). Mean annual precipitation is ~550 mm and mean annual temperature is 14°C, at the Laguna Aculeo meteorological station . With a surface covers 12 km² and a maximum water depth of 6 m, it is one of the largest natural lakes in the region. The lake has a small outflow on the eastern side, which runs dry in summer, is rarely filled with water even in winter, and at times in rainy winters even functions as an inflow . The major source of moisture comes from local precipitation. Summits near the southern end of the lake reach ~2000 m.a.s.l. (Altos de Cantillana), whereas those at the northern end reach 917 m.a.s.l. (Cerro La Caleta).

The dominant vegetation at Laguna Aculeo is described as *espinal*, a savanna-like scrub characterized by the tree *Acacia caven*, and mostly introduced herbs ; . An altitudinal survey around the sclerophyllous forests that surround the lake (Fig. 2.1) revealed the following vegetation zones:

1) Sclerophyllous forest (400-1250 m.a.s.l.): dominant trees are *Quillaja saponaria*, *Lithrea caustica*, *Cryptocarya alba* and *Peumus boldus*. Moist ravines and canyon bottoms are dominated by *Persea lingue*, *Crinodendron patagua*, *Beilschmedia miersii* and *Maytenus boaria*. A shrubland of *Talguenea trinervis* commonly occupies drier areas that have been cleared by human disturbance.

2) Sclerophyllous mountain matorral (1250-1900 m.a.s.l.) succeeds the sclerophyllous forest in altitude. This community includes the trees *Lithrea caustica*, *Schinus molle*, *Escallonia pulverulenta*, *Baccharis linearis*, *B. concava*, *Azara sp.* and *Kageneckia angustifolia*. Important among the herbs that dominate the dry slopes are the Andean grasses *Stipa* and *Poa*, together with *Acaena alpina*, *Mulinum spinosum*,

Chuquiraga oppositifolia, *Mutisia* spp., *Tetraglochin alatum* and *Chaetanthera* sp.

3) Monospecific stands of *Nothofagus obliqua* occur between 1900 and 2000 m.a.s.l., interspersed and succeeded by a high-elevation scrubland, which contains species also found in the high Andean vegetation, such as *Chuquiraga oppositifolia*, *Verbena spathulata*, *Tetraglochin alatum*, *Laretia acaulis* and *Viola cotyledon*.

We collected surface samples for pollen rain analysis along the same vegetation transects. The overall correspondence between the vegetation transects and their respective surface sample (Fig. 2.2) is supported by a CONISS ordination, which revealed the following altitudinal zonation:

1) High proportions of shrubs dominate below 800 m.a.s.l., these include Euphorbiaceae (5-40%), Asteraceae (15-30%), Chenopodiaceae (20%) and Poaceae (10-20%). This cluster represents the local vegetation surrounding the immediate vicinity of the lake.

2) Between 800-1550 m.a.s.l. the sclerophyllous forests are represented by *Quillaja saponaria* (10-20%), *Lithrea caustica* (5-20%), *Escallonia* (5-15%) and Euphorbiaceae (5-50%).

3) High percentages of Asteraceae (> 50%) and low percentages of *Escallonia* (5%), *Azara* (5%) and *Mulinum spinosum* (5-15%) represent the montane sclerophyllous matorral between 1550-1950 m.a.s.l.

4) *Nothofagus obliqua* (60%) and *Quinchamalium chilensis* (20%) predominate above 1950 m.a.s.l., representing deciduous forests and high Andean formations.

Materials and Methods

We obtained sediment cores from the deepest part of the lake using a 5-cm diameter modified Livingstone piston corer for palynological and sedimentological studies. The sediments consist of organic mud (*Gyttja*) between 0-215 cm; mainly silt between 215-300cm; sandy silt with carbonate mud between 300-395 cm; and fine sand with gravel lenses and silt with carbonate and gypsum between 395-482 cm. About 30 clastic layers (turbidites) occur in the sediments; eight of them occur in the upper 50 cm (1948-1998 AD), coinciding with El Niño years.

The core was dated using ^{15}C (table 2.1) and ^{210}Pb dates. A radiocarbon date near the base of the core gave an age of 8340 ± 230 ^{14}C yr B.P. Radiocarbon samples were converted to calendar years using the Calib 4.2 program. Based on these results we developed a calendar-age model to assign interpolated calendar ages to the pollen levels. The age model, which incorporates both ^{210}Pb and ^{14}C dates, consists of a second order polynomial equation ($r^2=0.99$; $p < 0.0001$). We subtracted the thickness of the flood layers (turbidites), for the purpose of calculating the interpolated ages, as these layers represent instantaneous deposition, as opposed to "normal" pelagic sedimentation.

Samples for pollen analysis were obtained at regular 5-cm intervals throughout the

sediment core, using a constant volume (3 cc). The sediment samples were demineralized according to standard techniques (KOH, HF and Acetolysis) , and *Lycopodium* spore tablets were added to calculate accumulation rates (influx). The basic pollen sum for each level includes at least 300 terrestrial pollen grains, which were analyzed at 400X and 1000X magnification. The results are expressed in percentage and accumulation-rate diagrams, using the results of the calendar age model. Pollen zones were defined with the aid of a Constrained Incremental Sum of Squares (CONISS) cluster analysis , applied to the terrestrial pollen taxa with abundance $\geq 2\%$, after recalculating sums and percentages. The basal portion of the core, between the depths 360-482 cm, did not contain enough pollen for analysis.

RESULTS

Pollen stratigraphy

The percent and accumulation rate diagrams (Figs. 2.3, 2.4) document the vegetation history from Laguna Aculeo during the last 7500 cal yr B.P. Both diagrams were divided into three pollen zones, based on conspicuous changes in the pollen stratigraphy and a CONISS ordination.

Zone LA 1 (7500-5700 cal yr B.P.)

Dominated almost exclusively by Chenopodiaceae pollen (80%) with other herbaceous and aquatic taxa amounting to <20% of the total sum. Traces of arboreal pollen include *Quillaja saponaria*, *Escallonia* and Anacardiaceae. Low pollen accumulation rates (Fig. 2.4) characterize this zone, except for Chenopodiaceae which exhibits exceptionally high values with strong fluctuations. *Q. saponaria*, Asteraceae and Euphorbiaceae all increase their accumulation rates toward the upper part of the zone.

Zone LA 2 (5700-3200 cal yr B.P.)

Chenopodiaceae pollen percentages drop substantially (from ~80% to ~40-60%), whereas the remaining herbs (Poaceae, Asteraceae, Apiaceae and Euphorbiaceae) show considerable increases, along with a slight increase of the tree *Maytenus boaria*. Among the aquatic taxa, Cyperaceae pollen percentages are close to 20%, and *Typha* reaches its maximum (~40%) near the upper and lower zone limits. Despite generally low influx values (Fig. 2.4), the herbaceous taxa (Poaceae, Apiaceae and Euphorbiaceae), trees (*M. boaria*, *Quillaja saponaria*) and aquatics (*Typha*, Cyperaceae) increase in their percent abundance.

Zone LA-3 A and B (3200- 0 cal yr B.P.)

The most prominent change in the pollen record occurs during this time. Chenopodiaceae percentages fall to their lowest values at ~25%, along with a major increase in Poaceae that reached values >30%. Other herbaceous taxa, however, show no significant increases relative to previous zones, excepting Liliiflorae and the aquatics. Pronounced increases in *Azara* and *Maytenus boaria* occur among the arboreal taxa. *Hydrangea serratifolia*, a rainforest vine currently absent from the modern vegetation and pollen rain of the Aculeo watershed, appears for the first time in the pollen record during this zone. An important pattern displayed by the accumulation rates (Fig. 2.4) is the almost synchronous behavior of all the indicators. Thus, a complete absence of Chenopodiaceae pollen occurs along with abrupt increases of all the other herbaceous and aquatic taxa (Poaceae, Liliiflorae, Asteraceae, Apiaceae, *Typha* and *Myriophyllum*). The vine *Hydrangea serratifolia* and the trees *M. boaria* and *Azara* also increase in unison. During the last 100 years (Zone 3B), the influx abundance of *M. boaria* and *Poaceae* decrease concomitant with an expansion of *Quillaja saponaria*, *Talguenea trinervis* and Chenopodiaceae. The high influx values exhibited by most taxa during Zone 3B contrast with the low values recorded in previous zones.

Charcoal and Microalgae Stratigraphy

The accumulation rates of microscopic charcoal particles (Fig. 2.5) reached their maxima during successive peaks between 5000-4500 and 3200-2500 cal yr B.P., as well as during the last 100 cal yr B.P. The first peak occurs at the beginning of pollen zone LA-2, synchronous with the beginning of the decline in and the expansion and diversification of herbs. The second peak occurs during a prominent rise in Poaceae, and the third peak occurs during historic times (Zone 3B).

The analysis of microalgal remains (Fig. 2.5) reveals the presence of *Pediastrum* species near the end of zone LA-1, at ~5500 cal yr B.P. Low values of *P. boryanum* and *P. duplex* occur between 5000-3200 cal yr B.P., followed by major increases between 3200-100 cal yr B.P. (Zone LA-3). An important expansion of *P. simplex* and *Scenedesmus* sp. occurs over the last 100 years.

DISCUSSION

The Laguna Aculeo record shows the absence of palynomorphs in sediments older than 7500 cal yr B.P. most likely attests to the presence of an ephemeral water body in the lake basin, under very arid and warm conditions. The presence of gravels, sands and calcitic-dolomitic silt with gypsum suggests a shallow-water, saline lake under arid conditions with high evaporation rates; (Fig. 2.6). Chenopodiaceae dominates the pollen record between 7500-5700 cal yr B.P. (Zone LA-1, Figs. 2.3, 2.4), all other taxa are

practically absent. These Chenopodiaceae-dominated assemblages do not have analogs in the modern vegetation and pollen rain from Laguna Aculeo (Fig. 2.2) and are comparable with surface samples from a coastal lagoon shore near Quintero (32°47' S, Villa-Martinez, 1995). These halophytes thrive in lake shores affected by seasonal water level fluctuations in Central Chile ;, thus suggesting a playa-like saline environment and lake levels lower than today. The fluctuating accumulation rates observed in Chenopodiaceae (Fig. 2.4) suggest strong variability in the extent of Laguna Aculeo. These assertions are supported by the presence of low organic content, gypsum, and variable amounts of carbonates within this interval, which we have interpreted as a seasonally fluctuating saline lake . The absence of green microalgal remains is consistent with this interpretation, along with the absence of diatoms before 5500 cal yr B.P. . Thus, all of the paleoenvironmental indicators strongly suggest extreme aridity and/or warm conditions at the lake and suggest a strong SPA and very infrequent westerly incursions.

Starting at about 5700 cal yr B.P. (zone LA-2) Chenopodiaceae pollen declines and other herbaceous taxa and trees (*Maytenus boaria*) increase in importance, suggesting a rise in humidity, which we interpret as increased westerly activity. This assemblage is most similar to the surface samples collected below 500 masl in the modern watershed and imply increase vegetation cover than previous lapse. Concomitantly, the organic matter in the sediments increased and carbonates disappeared, suggesting an overall increase in lake level due to increased moisture . Low values of *Pediastrum boryanum* and *P. duplex* occur during this lapse. *P. boryanum* is an indicator of oligotrophic lake conditions, whereas *P. duplex* prefers more mesotrophic conditions, according to modern distributions of both species in the Lake District and Central Chile . A sequence of oligo- to mesotrophic lake conditions is thus implied at Laguna Aculeo for this time.

The most prominent change in the pollen record occurs at 3200 cal yr B.P., and consists of a large drop in Chenopodiaceae and expansion of Poaceae, along with *Typha*, Cyperaceae, and the hygrophilous vine *Hydrangea serratifolia* (absent from the present flora) and *Maytenus boaria* (which prefers moist soils, S. Tellier and C. LeQuesne, personal communication, 2000). This vegetation change implies a significant rise in moisture over the watershed. One important feature in this part of the record is the synchronous, fluctuating behavior displayed by all the pollen and microalgal accumulation rates (Figs. 2.4, 2.5), suggesting high variability in precipitation, and varying oligo- to mesotrophic conditions. The onset of organic mud deposition documents a profound limnological change that may imply an overall increase in lake depth (Fig. 2.6).

An increase in the Chenopodiaceae/Poaceae pollen ratio, decline in aquatic taxa (*Typha* and *Myriophyllum*), and the replacement of *Maytenus boaria* by *Quillaja saponaria* over the last 100 years (Zone LA-3b), are all indicative of increased aridity. We cannot discard human disturbance, however, as the cause for the vegetation changes observed during this recent interval. In fact, during this interval the accumulation rates of charcoal, green microalgae *P. simplex* and *Scenedesmus* sp. (Fig. 2.5), both eutrophic indicators , and diatoms reach the highest values of the Holocene. Hypereutrophy, which has intensified during the last 30 years, is most likely associated with increased human activity at the lake related to tourism and agricultural use .

Fire history

Three major increases in microscopic charcoal particles occur over the last 7500 years in the Laguna Aculeo record (Fig. 2.5). The first peak, dated at 100 cal yr B.P., is associated with modern human activity in the basin. Additional peaks occurred between 3000-2500 and 5500-5000 cal yr B.P., linked to major pollen events that indicate wetter conditions. These charcoal maxima also occur at Laguna Tagua Tagua, which exhibits charcoal peaks between 9000-6800 and 2750-160 cal yr B.P., during moist intervals.

Why would increases in microscopic charcoal particles correlate with the expansion of hygrophilous vegetation? One explanation may relate to ignition by electrical storms. Although electrical storms are presently very rare in Central Chile they can occur when cold air, high altitude nuclei reach the area during summer and fall (P. Aceituno, personal communication, 2001). If our interpretation is correct, fire events occurred in the past during highly variable transitional climates, when the probability of natural fires may have increased during the dry seasons.

Alternatively, fires may have resulted from prehispanic human activities. The Laguna Tagua Tagua record shows charcoal peaks during the Holocene, which were interpreted as indicative of human burning. Additionally, the presence of *Phaseolus* pollen at ~5600 cal yr B.P. in the Cuchipuy archeological site, demonstrates the permanent or semi-permanent presence of human populations in the Laguna Tagua Tagua basin. Very little is known, however, regarding any human occupations of the Laguna Aculeo watershed and the archaeological record at present extends back only 1000 years (F. Falabella, personal communication, 2001).

Regional implications

The paleoclimate trends revealed by the Laguna Aculeo record are comparable with previous studies in the region. Some of those studies suggest widespread arid and warm conditions in Central Chile during the early to middle Holocene. The pollen record from Laguna Tagua Tagua (34°30' S), indicates dry and warm conditions between ~7000-3000 cal yr B.P., when the lake reached its lowest Holocene levels. Based on geomorphologic and paleopedologic evidence from the Norte Chico area (27-30°S), Veit inferred arid conditions between 7600-5600 cal yr B.P. Warm and dry conditions are also implied by deep sea sedimentary records off the Valparaíso (33°S) coast between 8000-4000 cal yr B.P.

Few records in central Chile document the onset of the humid phase at 5700 cal yr B.P. Paleosoils from the Norte Chico indicate the beginning of this phase at 5600 cal yr B.P. Pollen records along coastal north-central Chile also imply an increase in humidity during this time, as inferred by the cessation of dune formation at Quintero (32°47' S).

The late Holocene wet phase has been profusely documented in other paleoenvironmental records from central Chile. A more humid climate based on the expansion of Poaceae and the presence of *Nothofagus dombeyi*-type was inferred at

Laguna Tagua Tagua and was concomitant with the appearance of Myrtaceae swamp forests along the coast .

The Laguna Aculeo record frequent, large-magnitude fluctuations in the pollen and microalgal accumulation rates starting at 3200 cal yr B.P. The presence of numerous clastic layers, the most massive of which coincides with the bottom of zone LA-3a (fig. 2.3) , have been interpreted as flooding probably during very rainy winters .These flooding events could explain the synchronous fluctuations observed in the pollen influx rates and also suggest an overall increase in precipitation variability. This may partly be caused by high-frequency variability similar to El Niño-Southern Oscillation (ENSO), which at present affects central Chile by generating increased winter rainfall on interannual to decadal timescales . Clastic layers in the Laguna Aculeo record represent the distal, subaqueous expression of alluvial events throughout the watershed, possibly related to torrential rains during strong El Niño events. According to Jenny et al. flood layers (turbidites), deposited before 9000 cal yr BP, appear to have been absent during the mid-Holocene until about 5700 cal yr BP, but became especially abundant after 3200 cal yr B.P.

This pattern agrees well with descriptions in several records which indicate that ENSO has been active only over the last 5000 years . Based on analysis of fossil mollusks from coastal archaeological sites in Peru, Sandweiss et al. suggested that El Niño events were less frequent than today between ~5800 and 3200–2800 cal yr B.P., with modern recurrence intervals achieved only after that time. Based on an alluvial sediment record from Laguna Pallcacocha in Ecuador, Rodbell et al. suggested that ENSO frequency has increased progressively over the last 7000 cal yr, with the establishment of modern frequencies at ~5000 cal yr B.P. Based on coral records from Papua-New Guinea, Tudhope et al. suggested that the amplitude of ENSO events has been significantly larger over the last 3000 years when compared to 6500 cal yr. B.P. Moreover, deep sea records off the coast of central Chile (33°S) show elevated variability in planktic foraminifera composition, which was interpreted as increases in precipitation, coupled with strong, El Niño-like, climatic variability over the last 3000 years .

Conclusions

The high-resolution, multiproxy record from Laguna Aculeo indicates that arid conditions prevailed in central Chile prior to 5500 cal yr B.P. Increased aridity in this region suggests a strong blocking influence of the Pacific Anticyclone and/or subdued westerlies. A rise in precipitation started at ~5500 cal. yr B.P., implying an increase in westerly activity. A subsequent intensification of this trend started 3200 cal yr. B.P., along with increased rainfall variability at sub-centennial time scales. We interpret this condition as resulting from more frequent/intense El Niño-like activity. For the last 100 years the landscape around Laguna Aculeo has been transformed by increased human activity.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank FONDECYT (grant N° 2990012), the University of Colorado INSTAAR - Laboratory for AMS Radiocarbon Preparation and Research for AMS ^{14}C date subsidies (IAI and NSF-ATM 9809285). We also thank Peter Appleby for ^{210}Pb dates and Mebus Geyh for conventional ^{14}C dates. We are grateful to Willi Tanner, Martin Grosjean, Blas Valero and Marc Begert for their help in the field. Coring field work at Laguna Aculeo was funded by the Swiss National Science Foundation, NSF 20.56908.99 to Heinz Veit. Many thanks to P.I. Moreno and C. Latorre for constructive comments.

LITERATURE CITED

Table 2.1: Radiocarbon dates and calibrated ages for the Laguna Aculeo record.

Depth [cm]	Age [^{14}C yr B.P.]	Age [cal yr B.P.]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰ PDB]	Material dated	Laboratory code
5	>AD 1963		-17.6	OM (organic matter)	Hv-23487
89.5	755±65	730 (670) 650	-24.8	OM	Ua-16877
110	920±65	920 (790) 730	-29.6	Small wooden, charcoal	Ua-15089
116	1065±165	1270 (950) -760	-24.6	OM	Hv-22728
145.5	1630±55	1540 (1520) 1410	-28.5	wood	NSRL-10855
162	1800±40	1730 (1710) 1630	-15.6	Aquatic plants	NSRL-10856
169.5	2195±95	2330 (2150) 2010	-22.9	OM	Hv-22729
212	2960±45	3210 (3110) 3000	-28	Charcoal, Chenopodiaceae seed	NSRL-11019
245	3450±40	3720 (3660) 3640	-18	plants	NSRL-10859
281	4680±45	5470 (5390) 5320	-25.2	Chenopodiaceae, Carex	NSRL-10857
325	5380±110	6280 (6140) 5950	-25.8	Charcoal, fruits	Ua-15090
369	7640±215	8600 (8400) 8180	-25.5	OM	Hv-23962
398.5	8340±220	9530 (9350) 9010	-25.1	OM	Hv-23963
444	8390±230	9550 (9380) 9030	-25.6	OM	Hv-23488

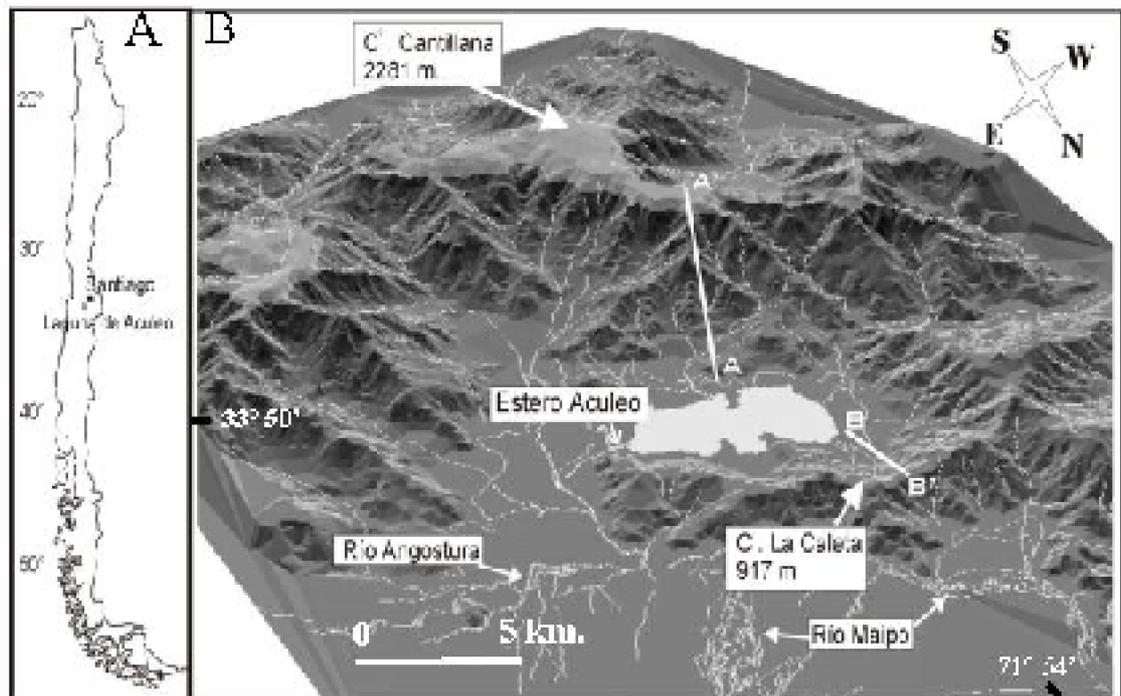


Figure 2.1: A) locality map indicating Laguna de Aculeo in the Mediterranean region of Central Chile, just within the northern border of the regular influence of the westerlies. B) Oblique view of the study site, showing the rinconada (amphitheater) formed by the encircling eastern slopes of the Cordillera de la Costa. The vegetation surveys were conducted along the transects between points A-A' and B-B'.

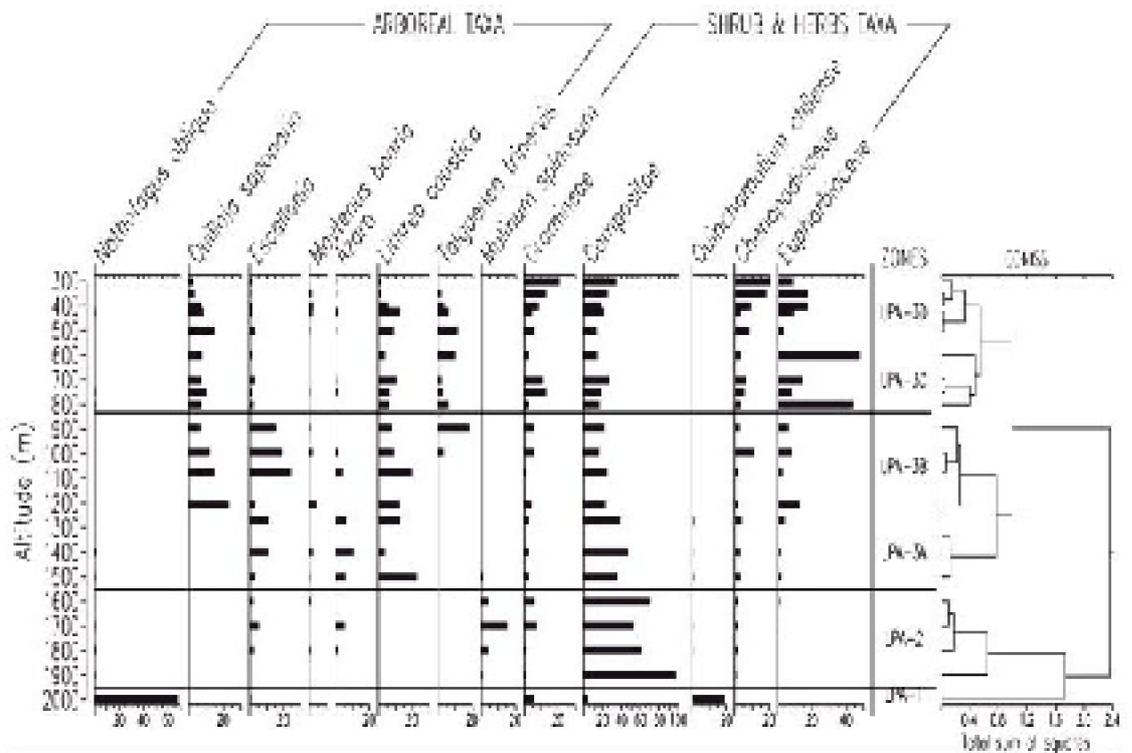


Figure 2.2: Pollen rain contents of surface soils samples obtained from the Laguna de Aculeo watershed. Surface soil samples were taken in the same vegetation surveys. The samples (3 cc) were processed according to standard techniques (Faegri and Iversen 1989), and pollen counts follow the fossil pollen.

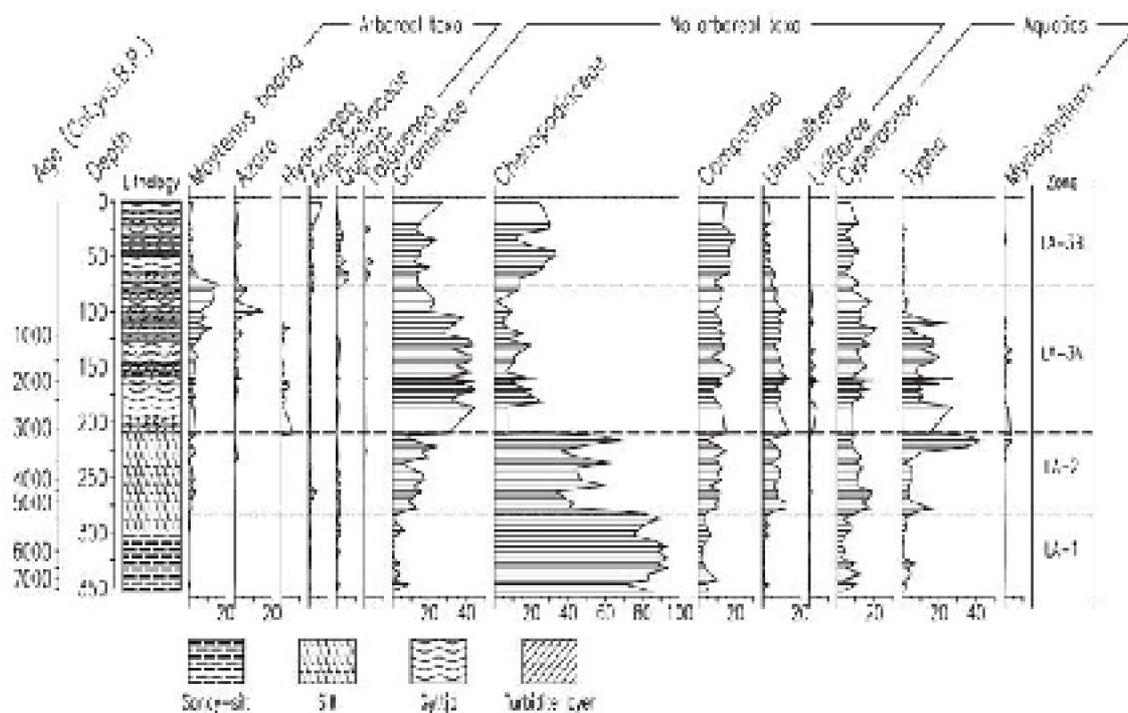


Figure 2.3: Percentage diagram of selected taxa from the Laguna de Aculeo record. The stratigraphic column is modified from Jenny et al (2002b).

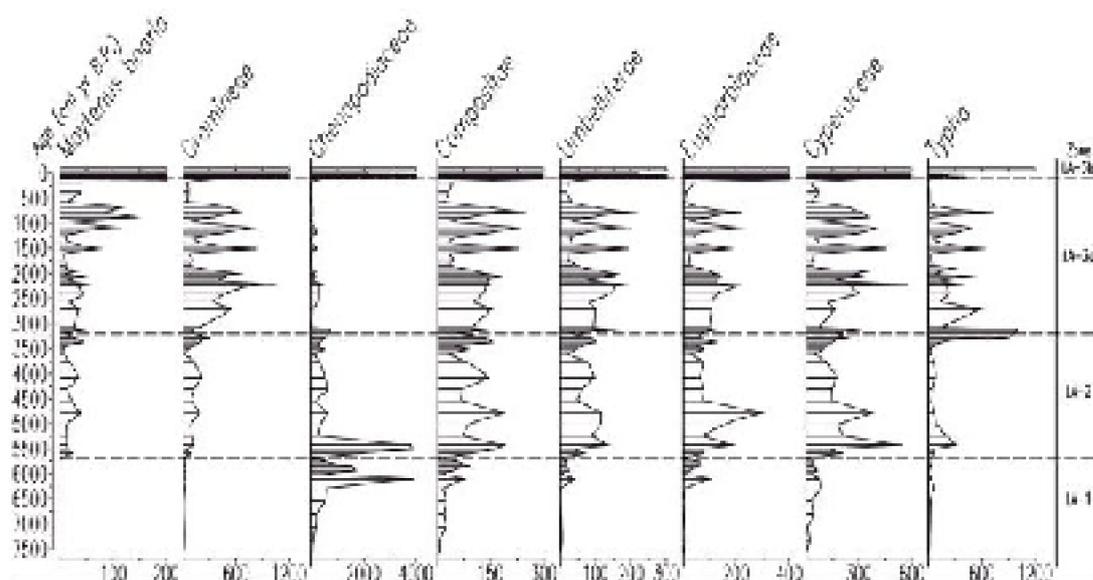


Figure 2.4: Pollen influx rates for selected taxa from the Laguna de Aculeo record. Note truncation of the last 100 yrs for visualization purposes. Note different scales for the taxa shown.

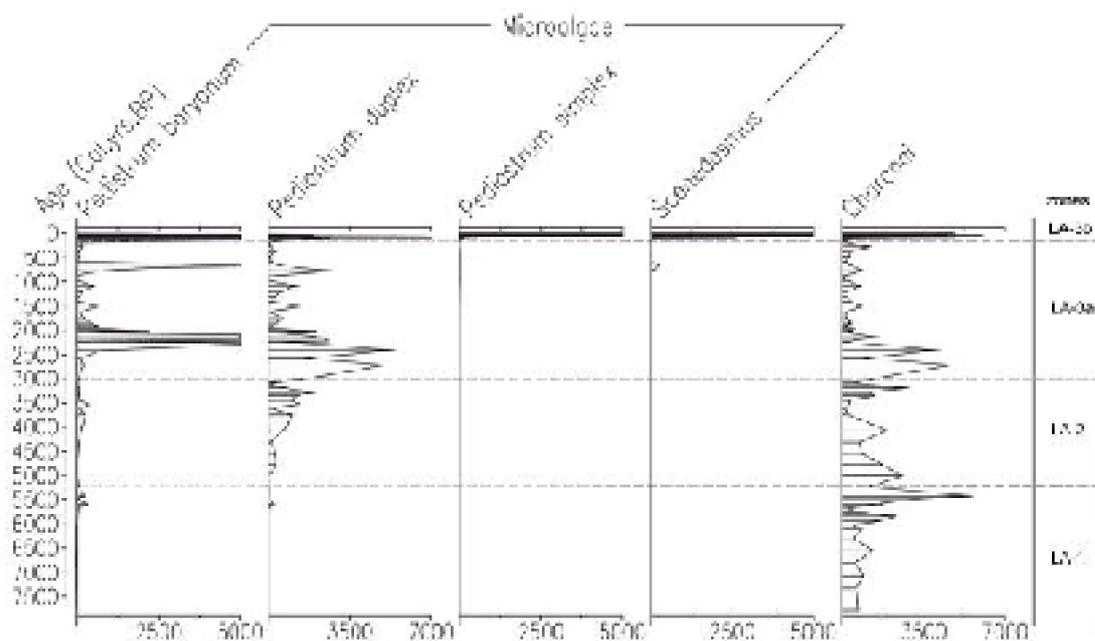


Figure 2.5: Charcoal microparticle and microalgae influx at Laguna de Aculeo. Note truncation of the last 100 yr. for visualization purposes. Note different scales for the taxa shown.

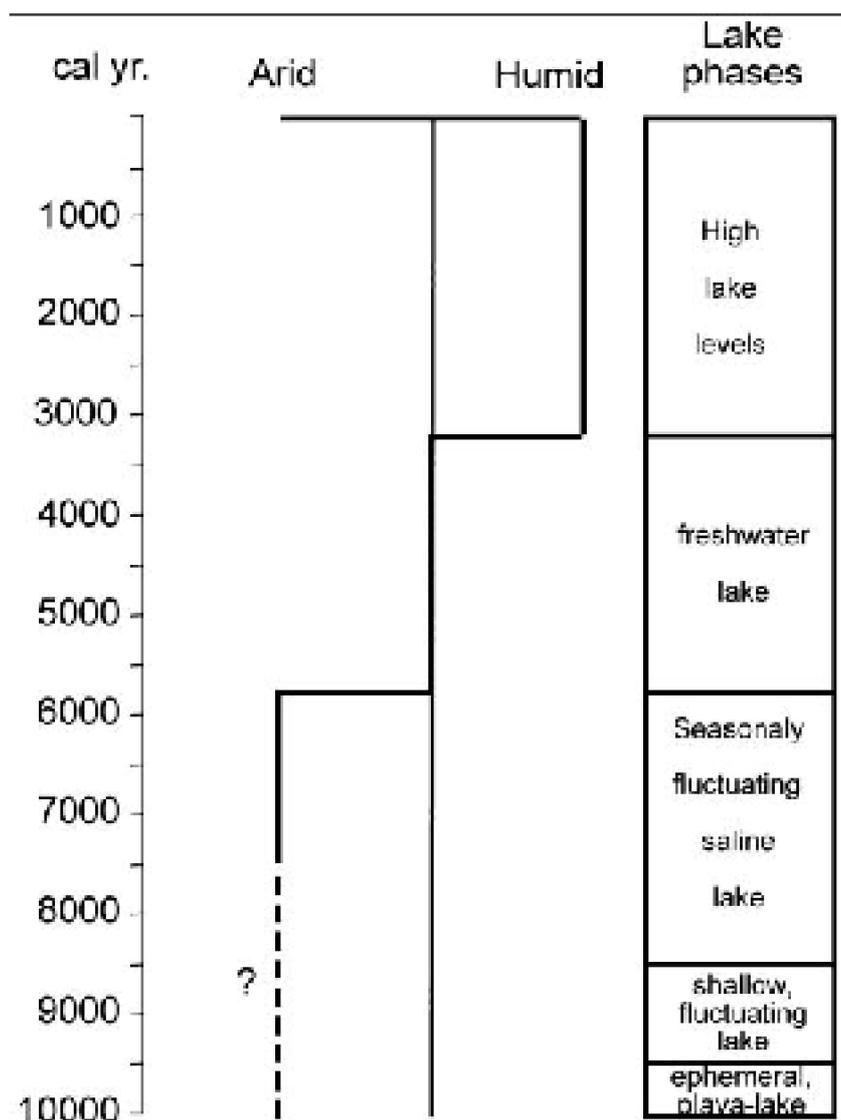


Figure 2.6: Paleoclimatic interpretation of the Laguna de Aculeo record and a comparison with lake history. Lake phases are derived from sedimentological and geochemical data after Jenny et al. (2002b).

CAPITULO 3

Pollen evidence for Late Holocene climate variability at Laguna de Aculeo, Central Chile (lat. 34° S)

Rodrigo Villa-Martinez¹, Carolina Villagrán¹ and Bettina Jenny²

1) Laboratorio de Palinología, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. Casilla 653, Santiago, Chile. rvillama@icaro.dic.uchile.cl

2) Department of Physical Geography, University of Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern, Switzerland.

Abstract

Here we present a pollen record from Laguna de Aculeo (33°50'S, 70°55'W, 360 masl) that documents important vegetation changes over the last 2500 cal yr in Central Chile. Grasses, composites, paludal, arboreal and aquatic taxa, dominated the Aculeo watershed between 2500 and 100 cal yr BP under a climate more humid than today. Large amplitude fluctuations of pollen accumulation rates and numerous turbidite layers, however, suggests high precipitation variability probably linked to El Niño-Southern Oscillation (ENSO). The expansion of sclerophilous forest taxa over the last 100 years, could be interpreted as an onset of a drier and warmer climate. We argue, however, that this trend was more likely linked to human activities in the watershed as evidenced by high accumulation rates of microscopic charcoal particles, exotic pollen taxa, and a shift from oligo-mesotrophic to hypereutrophic indicators.

Keywords: Late Holocene, Central Chile, climatic variability, ENSO, Laguna de Aculeo.

Introduction

The precipitation regime in Central Chile (30-38°S) is mostly controlled by changes in the subtropical high pressure cell, also referred to as the South Pacific Anticyclone (SPA), which drives the frequency, intensity, and geographic extent of frontal activity associated with the westerly winds. The region is characterised by large seasonal and interannual variations in winter precipitation (Van Husen, 1967), in part caused by the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomenon. This is due to pressure anomalies associated with the negative (warm) ENSO phases, which allow a northward shift of westerly storms, causing higher-than-average precipitation in Central Chile. Conversely, positive (cold) ENSO phases reinforce the SPA, determining cold and dry conditions in this region (Aceituno 1988, 1990, Aceituno et al. 1993). This high climate sensitivity lends the Mediterranean region of Chile as a key area to monitor past variations of the westerly wind belt at subtropical latitudes.

To date, few studies in the Mediterranean region of Central Chile have examined in detail the vegetation, climate, and disturbance history over the last two millennia. Tree ring chronologies from the adjacent Andean region (Bonisegna, 1988, Villalba, 1990) have reconstructed extreme drought events and latitudinal movements of the SPA over the last 750 and 500 years, respectively. Using historical documents, Ortlieb (1994) inferred precipitation variability linked to ENSO events in Central Chile over the last 500 yrs. Within the same interval, historical records indicate that the Longitudinal Valley of Central Chile has experienced profound landscape transformations resulting from logging, agriculture, and livestock overgrazing since the mid-portion of the 16th century (Elizalde 1970).

Deep-sea records obtained off the central Chilean coast evidence humid conditions and high amplitude ENSO-like variability over the last 3000 cal yr. (Lamy et al., 1999, Marchant et al., 1999).

These records suggest that Central Chile in the late Holocene has experienced (i) high-frequency climate variability, (ii) climate changes at decadal and centennial time scales and, (iii) strong landscape degradation over the last few centuries. The scarce palynological studies of this area (Heusser 1983, 1990; Villa-Martínez & Villagrán 1997) suggest humid conditions over the last two millenium, but low sedimentation rates and poor temporal resolution imply that these records have not detected any climatic variability linked either to ENSO or to the beginning of human impact on the landscape.

Continuous, high-resolution sedimentary records from closed-basin lakes in Central Chile afford the opportunity to monitor past changes in local vegetation, hydrologic balance, and human disturbance. Detailed sedimentological and geochemical analyses in sediment cores from Laguna de Aculeo (33°50'S, 70°55'W), one of the few inland lakes present in Central Chile suitable for the study of past variations of the northern edge of the westerly winds, (Jenny et al., 2002) identified past precipitation variations throughout the Holocene. Numerous turbidites in this record, thought to represent flooding events, possibly are related to rainfall anomalies linked to past El Niño events. Here we report results of pollen analyses of the same sediment core and focus on exploring the possible impacts of such climatic variability on the local vegetation.

The study area

Laguna de Aculeo (33°50'S; 70°54'W, 360 masl) is located 50 km SE of Santiago, in the inland foothills of Cordillera de la Costa. The modern lake covers 12 km² and has a present maximum depth of 6 m (Cabrera & Montecinos 1982) (Fig. 3.1). Surface runoff feeds the lake through numerous small gullies and canyons from the encircling mountains, some of which surpass 2000 m in altitude (Fig. 3.1). The lake has small outflow on the eastern side, which run dry in summer, is rarely filled with water in winter, and at times in rainy winter even functions as an inflow (Mühlhauser & Vila 1987). The discharge through the Estero Aculeo, however, is minimal and the lake is considered a closed basin, chiefly fed by local precipitation and runoff (I. Vila, personal communication).

1) Sclerophilous forests dominate the vegetation that today surrounds Laguna de Aculeo (Schmithüsen 1956, Rundel 1981). A survey around the lake revealed the following vegetation zones (R. Villa-Martínez, unpublished data):

2) Sclerophyllous forest (400-1250 masl) with *Quillaja saponaria*, *Lithrea caustica*, *Cryptocarya alba* and *Peumus boldus* as dominant trees. Moist ravines and canyons are dominated by *Persea lingue*, *Crinodendron patagua*, *Beilschmedia miersii* and *Maytenus boaria*. Shrublands of *Talguenea trinervis* commonly occupy drier areas that have been cleared by human disturbance.

3) Sclerophyllous mountain matorral (1250-1900 masl) succeeds the sclerophyllous

forest in altitude. This community includes the trees *Lithrea caustica*, *Schinus montanus*, *Escallonia pulverulenta*, *Baccharis linearis*, *B. concava*, *Azara sp.* and *Kageneckia angustifolia*. Herbs are dominant on dry slopes and important among these are the Andean genera *Stipa* and *Poa*, along with *Acaena alpina*, *Mulinum spinosum*, *Chuquiraga oppositifolia*, *Mutisia spp.*, *Tetragochin alatum* and *Chaetanthera sp.*

Monospecific stands of *Nothofagus obliqua* occur between 1900 and 2000 masl, interspersed and succeeded by a high-elevation scrubland, which contains species also found in the high Andean vegetation, such as *Chuquiraga oppositifolia*, *Verbena sphatulata*, *Tetragochin alatum*, *Laretia acaulis* and *Viola cotyledon*.

Materials and methods

We obtained a 1.8 m core from the deepest part of the lake using an anchored raft and a Livingstone piston corer. The lake sediments consist of organic mud (gyttja), and numerous (>20) silty-clay laminae (Fig. 3.2). Eight of these layers occur in the last 50 cm (1948-1998 AD), and are thinner and less well-developed than those found between 180-50 cm, and correlating mainly with El Niño years (Jenny et al., 2002).

We developed an absolute chronology for the core using seven radiocarbon and 25 ^{210}Pb dates (tables 3.1 and 3.2). Radiocarbon samples were calibrated to calendar years using Calib 4.2 (Stuiver & Reimer 1993). Based on these results we developed a calendar-age model to assign interpolated calendar ages to the pollen levels. The model consists of a second order polynomial ($r^2=0.99$; $p<0.001$) based on both ^{210}Pb and ^{14}C dates. For calculation of the calibrated age scale, the thickness of the flood layers (turbidites) was subtracted, because they were deposited very rapidly compared to "normal" sedimentation rate (Jenny et al. 2002)

We processed a constant volume of sediment samples (3 cm^3) at regular 5-cm intervals along the core for pollen analysis. The samples were processed following standard techniques (KOH, HF, acetolysis) (Faegri & Iversen 1989), and by adding *Lycopodium* spore tablets (Stockmarr 1971) to calculate concentration and accumulation rates (influx) of pollen, spores, green microalgae, and charcoal particles. The basic pollen sum for each level includes at least 300 terrestrial pollen grains, which were analyzed at 400X and 1000X magnification. The results are expressed in percentage and influx diagrams, using the results of the calendar age model. Pollen assemblage zones were defined with the aid of a Constrained Incremental Sum of Squares (CONISS) cluster analysis (Grimm, 1987), applied to the terrestrial pollen taxa with abundance $\geq 2\%$, after recalculating sums and percentages.

Results

Pollen Stratigraphy

We defined three pollen zones for the Laguna de Aculeo record (Fig. 3.2), based on conspicuous changes in the pollen stratigraphy and a CONISS ordination.

Zone LA-1 (2500-700 cal yr BP)

Herbs (Gramineae, Chenopodiaceae, Compositae, Euphorbiaceae, Umbelliferae) are dominant, along with paludal and aquatic taxa (Cyperaceae, *Typha*, *Myriophyllum*), and trace amounts (<5%) of hygrophilous trees and vines (*Maytenus boaria*, *Azara*, *Hydrangea serratifolia*) (Fig.3.2). With the sole exception of Poaceae, all the other taxa have low and covariant accumulation rates throughout this zone (Fig. 3.3).

Zone LA-2 (700-100 cal yr BP)

Most wetland and herbaceous taxa decline (Gramineae, Umbelliferae, Euphorbiaceae, *Typha*, *Myriophyllum*, Cyperaceae), and arboreal pollen percentages increase (*M. boaria*, *Azara*). Accumulation rates decline substantially for most taxa, except for *M. boaria* and *Azara*, which exhibit only a modest decline. The arboreal taxa *Quillaja saponaria*, *Talguenea trinervis* and *H. serratifolia*, disappear from the record.

Zone LA-3 (100-0 cal yr BP)

Chenopodiaceae pollen percentages reach a maximum of 30%, whereas Gramineae retains the same abundance of the previous zone (~20%). Percentage values of other herbs (Compositae, Euphorbiaceae) increase slightly. The presence of *Pinus* and *Plantago* attest to human disturbance. *M. boaria* virtually disappears from the record, and increases occur in the more drought-resistant *Q. saponaria* and *T. trinervis*. An abrupt increase in the pollen accumulation rates of all taxa (Fig. 3.3) is associated with a prominent change in sedimentation rate. In contrast, the accumulation rates of *M. boaria* decline to minimal values.

Microalgae and Charcoal Stratigraphy

The accumulation rates of microalgae are consistently low throughout the record, save for the last 100 years (Fig. 3.4a). *Pediastrum boryanum* and *P. duplex*, both oligo-mesotrophic indicators, fluctuate at relatively high levels near the base of the core but decrease upwards. Microalgal remains virtually disappear in Zone LA-2. This situation reverts during the last 100 years, when microalgae reach maximum values. The record indicates that between 100 and 30 cal yr BP the oligo-mesotrophic *P. boryanum* and *P. duplex* are dominant, whereas the hypereutrophic *P. simplex* and *Scenedesmus sp.* become dominant over the last 30 years

The accumulation rates of microscopic charcoal particles are consistently low throughout the record (Fig. 3.4b), except for a sharp increase observed at 2400 cal yr. and the last 90 years.

DISCUSSION

The Laguna de Aculeo pollen record shows important changes in the local vegetation over the last 2500 years. These changes are evident both in the percentage and influx abundance of all plant taxa, microalgae, and microscopic charcoal particles.

The results show that hygrophilous taxa (*Typha*, Cyperaceae) dominate the record between 2500 and 100 cal yr BP, along with Poaceae and other herbs. The presence of *Maytenus boaria* and *Hydrangea serratifolia* suggest humid conditions considering that (i) *M. boaria* commonly thrives on moist soils (S. Tellier and C. LeQuesne, personal communication), and that (ii) *H. serratifolia* is a woody climber characteristic of humid forest in this region. The multiple, large-amplitude fluctuations observed in *M. boaria*, *H. serratifolia*, Gramineae, and Chenopodiaceae pollen within this interval, suggest high paleoenvironmental variability (Fig. 3.3). Low amounts of microalgal remains during the same interval suggest oligotrophic conditions and high lake levels.

The decline and disappearance of *Maytenus boaria* in the last 100 years of the record would imply drier and slightly warmer conditions. Concomitant increases in Chenopodiaceae and warm sclerophyllous arboreal taxa pollen (*Quillaja saponaria*, *Talguenea trinervis*, Anacardiaceae) are consistent with this interpretation. The microalgae record, however, suggests that these short-term vegetation changes observed in the Aculeo watershed may in fact be anthropogenically induced. The transition from oligo-mesotrophic to hypereutrophic conditions, as implied by the decline in *Pediastrum boryanum* and *P. duplex* and the expansion of *P. simplex* and *Scenedesmus sp.*, is synchronous with increasing phosphate concentrations (Jenny et al., 2002). This trend is consistent with the maximum abundance of the diatoms *Aulacoseira granulata*, *Melosira pseudogranulata*, and *Cyclotella operculata* from Laguna de Aculeo (Jenny et al., 2002). Habitat degradation of anthropogenic origin is also suggested by prominent peaks in the stratigraphy of microscopic charcoal particles over the last 100 years. There is ample historical evidence of fire-use in agricultural practices and land clearance in Central Chile over the last 400 yr (Elizalde, 1970).

Based on the pollen record from Laguna Aculeo we conclude that precipitation increases over the last 2500 years were probably the result of the varying frequency and/or intensity of westerly storms. This climate instability is well recorded in the sedimentological analysis of sediment cores from Laguna Aculeo conducted by Jenny et al. (2002), who revealed numerous turbidite layers. These layers were interpreted as local floods resulting from above-average rainy winters over the watershed. Repetitive periods of high precipitation also might account for the abrupt fluctuations observed in the pollen influx, and to a lesser degree, the microalgae and charcoal records (Figs. 3.3 and 3.4).

The data from Laguna de Aculeo indicate periods of large-amplitude rainfall variability at sub-centennial time scales, possibly linked to extreme ENSO phases. Several authors have proposed that ENSO was intensified over the last 3000 years (McGlone et al 1992, Mörner 1993, Ortlieb et al 1993, Veit 1995). Based on fossil mollusk assemblages from

beach ridges in northern Peru, Ortieb et al (1993) documented exceptionally strong El Niño events for the middle and late Holocene. More recently, Tudhope et al. (2001) suggested that the amplitude of ENSO events has been significantly larger over the last 3000 yr compared to 6500 yr. B.P. Moreover, deep sea records off the coast of central Chile present increases in terrigenous deposition and elevated variability in planktic foraminifera composition, which are thought to correspond to an increases in precipitation, coupled with strong, ENSO-like, climatic variability over the last 3000 years (Lamy et al., 1999, Marchant et al., 1999).

Our conclusion of increasingly wet conditions during the last 2500 years also replicates previous paleoclimate studies in central Chile: (i) the establishment of swamp forest vegetation in the Quintero (32°47'S), and Ñague (31°50'S) sites around 2000 ¹⁴C yr BP (1970 cal yr.) in the coastal region of central Chile (Villa-Martínez & Villagrán 1997, Maldonado 1999, Villagrán & Varela 1990); and (ii) the Laguna de Tagua Tagua (34°30'S) site shows an increase in Poaceae and *Nothofagus dombeyi*-type pollen starting at about 2600 ¹⁴C yr BP (2750 cal yr, Heusser 1983, 1990). Veit (1996) based on pedogenic evidence between 27-33° lat. S, hypothesized that wet periods between 2000-1600 and 600-200 ¹⁴C yr BP (1970-1500; 630-285 cal yrs BP) and dry periods between 1600-600 ¹⁴C yr BP and since 200 ¹⁴C yr BP could be explained by northward and southward shifts of the westerlies. A similar wet phase between 2200-1800 ¹⁴C yr BP (2180-1720 cal yr BP) attributed to enhanced westerly activity was identified at Laguna del Negro Francisco (27°28'S, 4125 masl; Grosjean et al, 1997).

In conclusion, our pollen, microalgae and charcoal data document for first time that the humid climate present in Central Chile was highly variable in terms of precipitation and was clearly caused by varying frequency and/or intensity of westerly storms, the result of shifting ENSO activity. Changes in plant composition and water nutrient content over the last century were most likely caused by increases human activity in the Laguna de Aculeo watershed. The advanced degree of landscape transformation around Laguna de Aculeo contrasts with historical accounts by Graham (1824), who described dense forests surrounding a lake of crystalline waters, a picture very different from the *Acacia caven* thornscrub that occupies the watershed today and the hypereutrophic water. The 19th century Chilean painter, Onofre Jarpa, in his painting entitled "Laguna de Aculeo", captured a lush green scenery surrounding the lake, with dense forests of what can only be *Maytenus boaria*.

Acknowledgements

Research was funded by FONDECYT grant No 2990012 to R.V.M. AMS ¹⁴C dating was funded by NSF (ATM-9809285) to the University of Colorado-INSTARR's Laboratory of AMS Radiocarbon Preparation and Research. Core sampling at Laguna de Aculeo was funded by Swiss NSF 20.56908.99 to Heinz Veit. We thank Peter Appleby for ²¹⁰Pb dates and Mebus Geyh for ¹⁴C dates. We also thank Willi Tanner and Martin Grosjean for help in core sampling. We thank I. Vila and V. Montecinos for their help with the

microalgae record, and P.I. Moreno and C. Latorre for critical reviews and editorial assistance.

Literature Cited

Aceituno, P. 1988: On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: surface climate. *Monthly Weather Review* 116: 505-523.

Aceituno, P. 1990: Anomalías climáticas en la Región Sudamericana durante los extremos de la Oscilación Austral. *Revista de Geofísica* 32: 65-78.

Aceituno P, Fuenzalida, H. & Rosenblüth, B. 1993: Climate along the extratropical west coast of South America (pp 61-70). In Mooney, Fuentes & Kromberg (Eds.) *Earth systems responses to global change*. Academic press, London.

Boninsegna, J. 1988: Santiago de Chile winter rainfall since 1220 as reconstructed by tree rings. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 6: 67-87.

Cabrera, S. & Montecinos, V. 1982: Eutrophy in lake Aculeo, Chile. *Plant & Soil* 67:377-387.

Elizalde, R. 1970: *La sobrevivencia de Chile*. Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.

Faegri, K. & Iversen, J. 1989: *Textbook of pollen analysis*. Balkena, Amsterdam.

Graham, M. 1824: *Diario de mi residencia en Chile durante el año 1822 i de viaje a Brasil en 1823*. Translated from english by J. Valenzuela, Imprenta Cervantes 1902, Santiago.

Grimm, E. 1987: Coniss: A fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences* 13: 13-45.

Heusser, C. 1983: Quaternary pollen record from Laguna de Tagua Tagua, Chile. *Science* 219: 1429-1432.

Heusser, C. 1990: Ice age vegetation and climate of subtropical Chile. *Paleogeography, plaeoclimatology, Paleoecology* 80: 107-127.

Jenny, B., Valero-Garcés, B., Urrutia, R., Kelts, K., Veit, H. and Geyth, M. 2002: Moisture changes and fluctuations of the westerlies in Mediterranean Central Chile during the last 2000 years: The Laguna de Aculeo record (33° 50' S). *Quaternary International* 87: 3-18.

Lamarche, V., Holmes, R.L., Dunwiddie, P. & Drew, L. (1978) *Tree ring chronologies of the Southern Hemisphere. 2. Chile*. Chronology Series Laboratory of Tree Ring Research, University of Arizona, Tucson, Arizona.

Lamy, F., Hebbeln, D. and Wefer, G. 1999: High resolution marine record of climate change in mid-latitude Chile during the last 28000 years based on terrigenous sediment parameters. *Quaternary Research* 51:83-93.

Maldonado, A. 1999: Historia de los bosques pantanosos de la costa de Los Vilos (IV Región, Chile) durante el Holoceno medio y tardío. Masters Thesis, Universidad de Chile. XIV+79 pp.

Marchant, M., Hebbeln, D. and Wefer, G. 1999: High resolution planktic foraminiferal record of the last 13.300 years from an upwelling area off Chile. *Marine Geology* 161: 115-128.

Mörner, N. 1993: Present El Niño events and past Super- ENSO events. *Bulletin de l'Institut Français des Etudes Andines (IFEA)* 22: 3-12.

Mühlhauser, H. and Vila I. 1987: Eutrofización, impacto en un ecosistema acuático montañoso. *Archivos de Biología y Medicina Experimental* 20: 117-124.

Ortlieb, L. 1994: Las mayores precipitaciones históricas en Chile central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX. *Revista Chilena de Historia Natural* 67: 463-485

Ortlieb, L., Fournier, M. and Machare, J. 1993: Beach-ridge series in Northern Peru: Chronology, correlation and relationship with major Late Holocene El Niño events. *Bulletin de l'Institut Français Etudes des Andines (IFEA)* 22: 191-212.

Rundel, P. 1981: The matorral zone of central Chile. In di Castri, Goodall & Specht (Eds) *Mediterranean-type shrublands*. Elsevier, The Netherlands. 175-201.

Schmithusen, J. 1956: Die raumliche ordnung der chilenischen vegetation. *Bonner Geographische Abhandlungen* 17: 1-86

Stockmarr, J. 1972: Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et Spores* 13:615-622.

Stuiver, M. and Reimer, P.J. 1993: Extended ^{14}C data base and revised Calib 3.0 ^{14}C age calibration program. *Radiocarbon* 35:215-230.

Tudhope, A., Chilcot, C., McCulloch, M., Cook, E., Chappell, J., Ellam, R., Lea, D., Lough, J. and Shimmield, G. 2001: Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle. *Science* 291: 1511-1517.

Van Husen, C. 1967: Klimagliederung in Chile auf der basis von Häufigkeitsverteilungen der Niederschlagssummen. *Freiburger Geographische Hefte* 4, 113 pp.

Veit, H. 1996: Southern Westerlies during the Holocene deduced from geomorphological studies in the Norte Chico, northern Chile (27-33°S). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 123:107-119.

Villagrán, C. and Varela, J. 1990: Palynological evidence for increased aridity on the central Chilean coast during the Holocene. *Quaternary Research* 34:198-207.

Villalba, R. 1990: Latitude of the surface high-pressure belt over western South America during the last 500 years as inferred from tree-ring analysis. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 7:273-303.

Villa-Martínez, R. and Villagrán, C. 1997: Historia de la vegetación de bosques pantanosos de la costa de Chile central durante el Holoceno medio y tardío. *Revista*

Chilena de Historia Natural 70:391-401

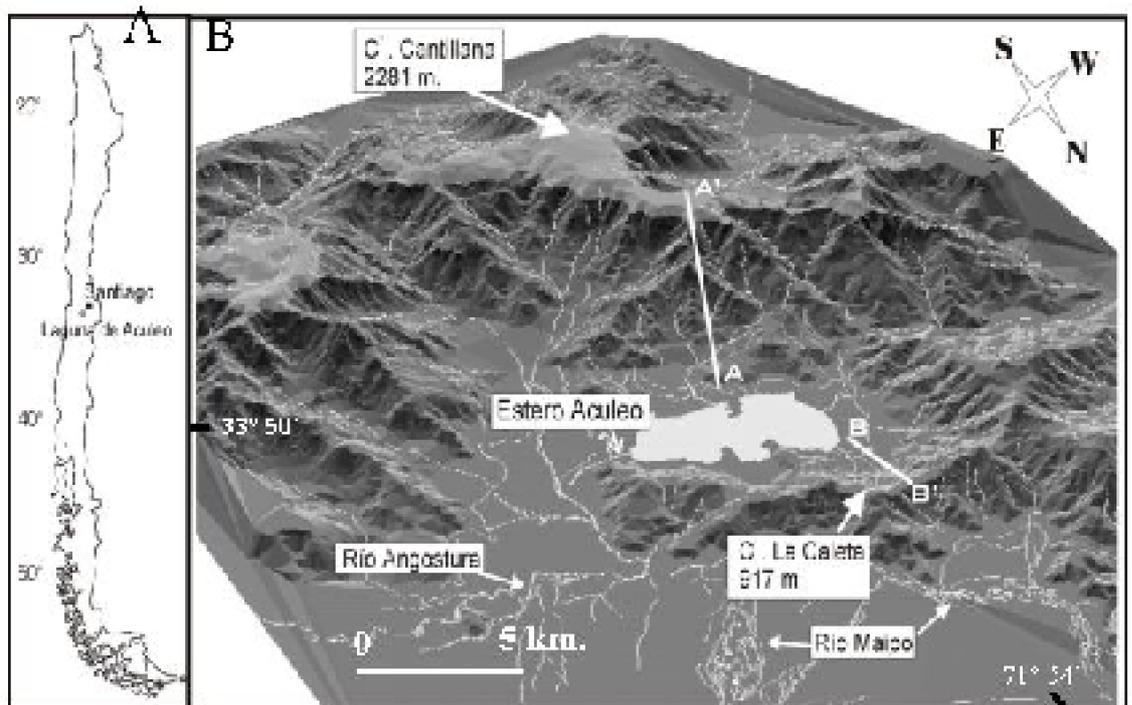


Figure 3.1: Map showing the location of Laguna de Aculeo in the Mediterranean region of Central Chile, just within the northern border of the regular influence of the westerlies. Oblique view of the study site, showing the rinconada (amphitheater) formed by the encircling eastern slopes of the Cordillera de la Costa. The vegetation surveys were conducted along the transects between points A-A' and B-B'.

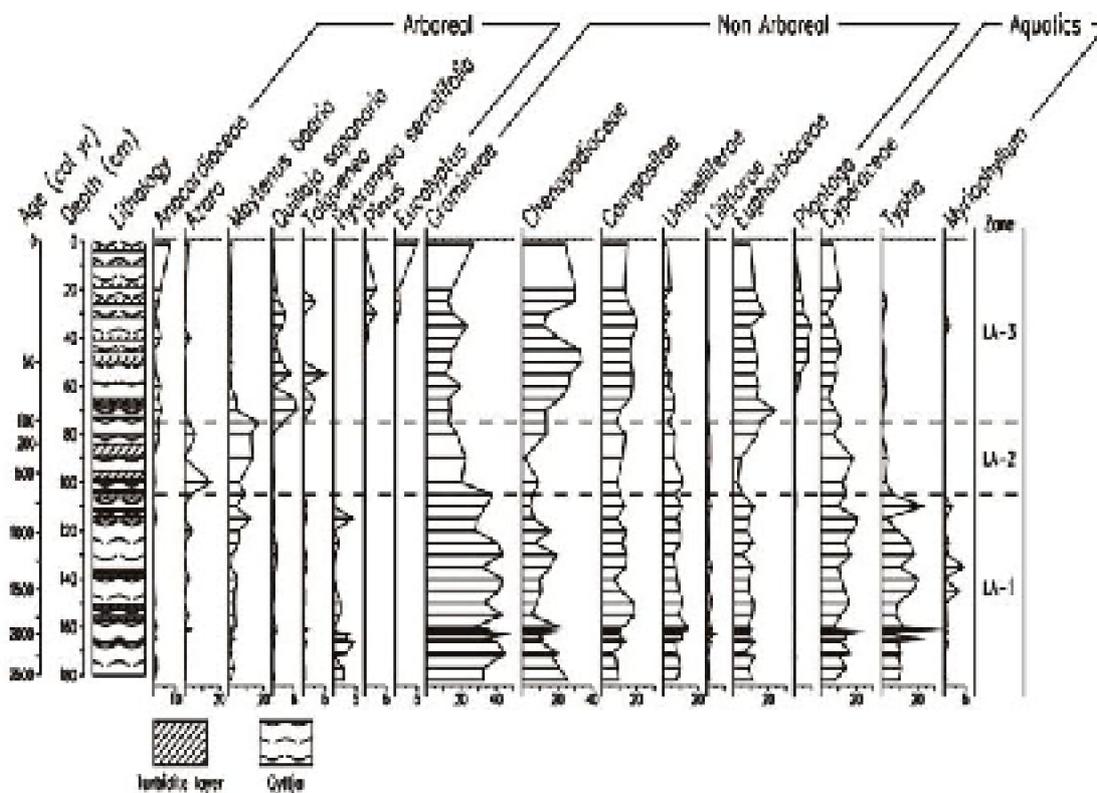


Figure 3.2: Percentage diagram of selected taxa and stratigraphic column of the Laguna de Aculeo record. Percentages scales among species vary for visual depiction only.

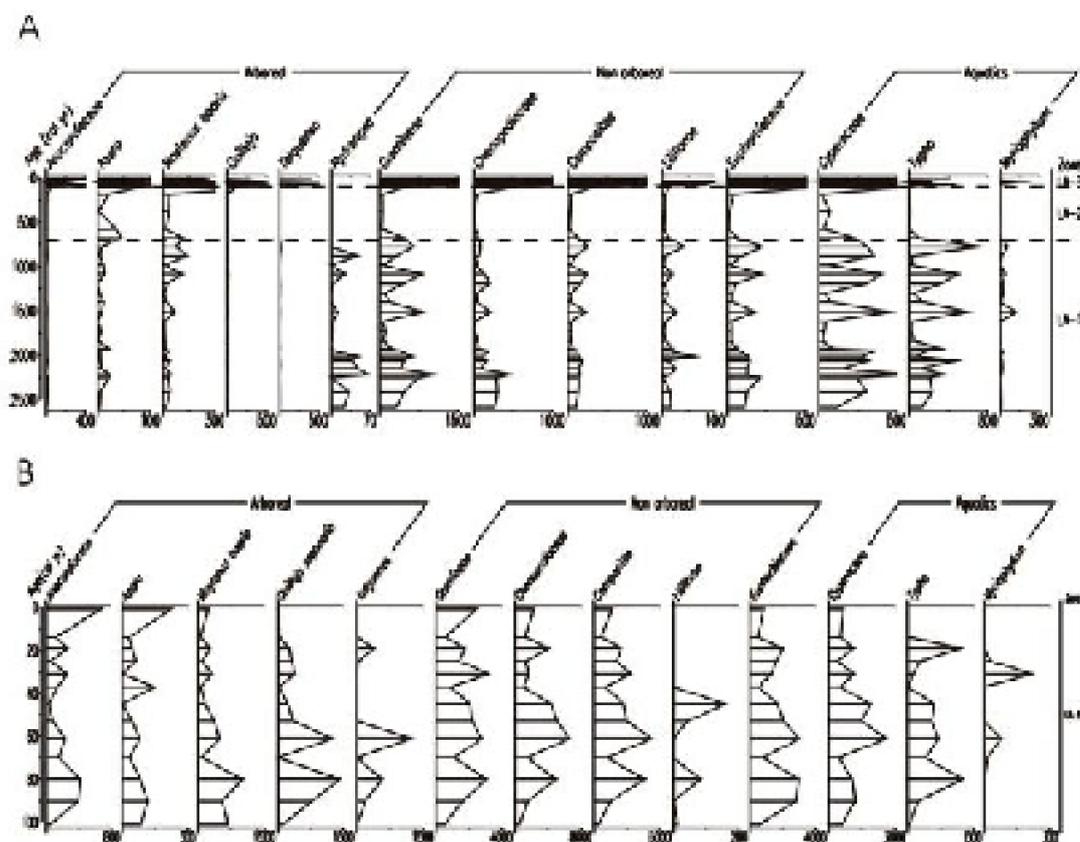


Figure 3.3: Pollen accumulation rates of selected taxa from the Laguna de Aculeo record. A) Accumulation rates for pollen zone LA-1 and LA-2. The LA-3 accumulation values have been truncated. B) Accumulation rates for pollen zone LA-3. Note that accumulation rate scales vary between both graphs and among taxa. Units are in No. of grains per cm^2 per yr.

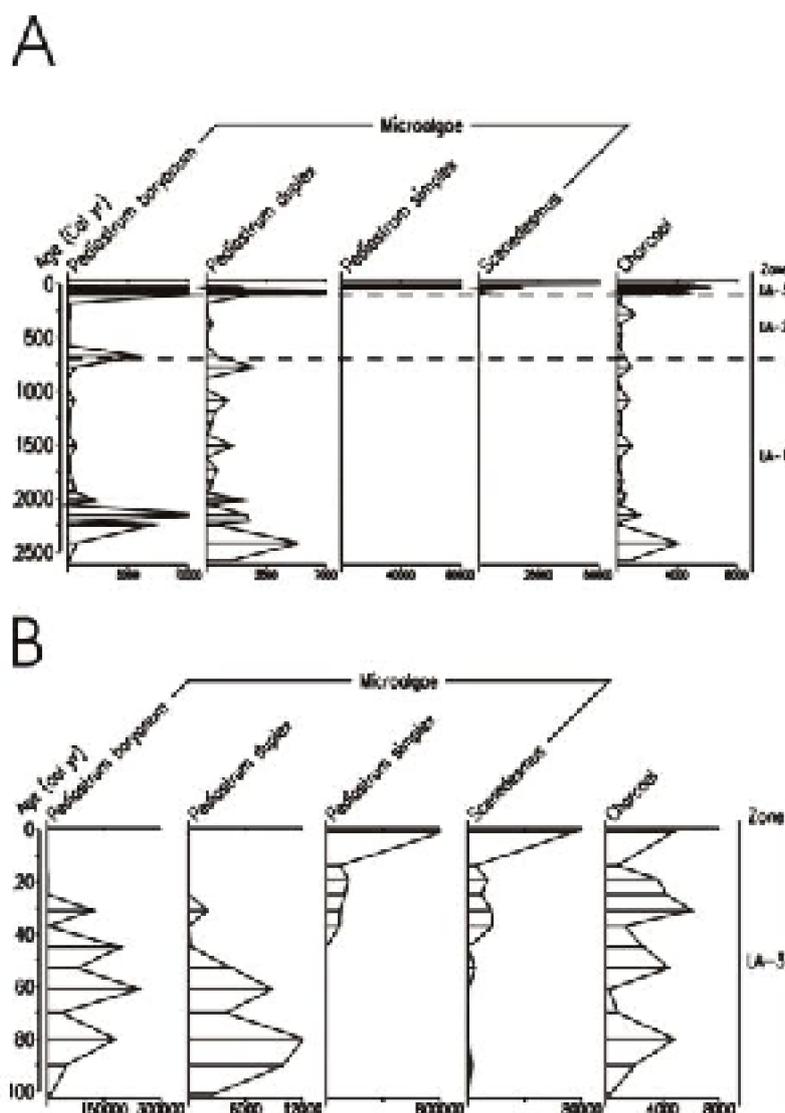


Figure 3.4: Accumulation rates for microscopic charcoal particles and microalgae from the Laguna de Aculeo record. A) Accumulation rates for pollen zone LA-1 and LA-2. The accumulation values for LA-3 have been truncated. B) Accumulation rates for pollen zone LA-3. Note that accumulation rate scales vary between both graphs and among species of microalgae and charcoal. Units are in microalgae/charcoal microparticles per cm^2 per yr.

Table 3.1: Radiocarbon dates for Laguna de Aculeo record. (Ua) Amstrong Laboratory, Uppsala (AMS); (OS) Radiocarbon Laboratory, Boulder (AMS); (Hv) Radiocarbon Laboratory, Hannover (conventional).

Historia del clima y la vegetación de Chile central durante el holoceno: una reconstrucción basada en el análisis de polen, sedimentos, microalgas y carbón

Laboratory Code	Depth (cm)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰PDB}}$	^{14}C range Age	Cal yr
Hv 23487	5	-17.6	AD 1963	-
Ua-16877	89.5	-24.8	755 \pm 70	731 (673)561
Ua 15089	110	-29.60	920 \pm 65	954 (877) 690
Hv 22728	116	-24.60	1065 \pm 165	1295 (964) 668
NSRL-10855	145.5	-28.50	1630 \pm 55	1691 (1529) 1393
NSRL-10856	162	-15.60	1800 \pm 40	1856 (1712) 1632
Hv 22729	169.5	-22.10	2195 \pm 95	2355 (2226) 1948

Depth (cm)	^{210}Pb age	Age (A.D.)
0	0 \pm 0	1998
1	1 \pm 1	1998
3	1 \pm 1	1997
5	2 \pm 2	1996
7	3 \pm 2	1995
9	4 \pm 2	1994
11	5 \pm 2	1993
13	6 \pm 2	1992
15	7 \pm 2	1991
17	8 \pm 2	1990
19	10 \pm 3	1988
21	11 \pm 3	1987
23	14 \pm 4	1984
25	18 \pm 4	1981
27	23 \pm 4	1975
29	20 \pm 4	1978
31	31 \pm 4	1967
33	33 \pm 4	1965
35	31 \pm 4	1967
37	36 \pm 4	1962
39	30 \pm 5	1968
41	40 \pm 5	1958
43	41 \pm 6	1957
45	43 \pm 6	1955
47	45 \pm 7	1953
49	47 \pm 0	1951

Table 3.2: ^{210}Pb chronology for Laguna de Aculeo Record. For more details about ^{210}Pb dating see Jenny et al (2002)

CAPITULO 4

Variabilidad climática durante el Holoceno tardío en la costa de Chile central: evidencias palinológicas de Laguna Matanzas (Reserva Nacional El Yali, 33°46'S)

Rodrigo Villa-Martínez¹, Bettina Jenny², Mebus Geyh² y Carolina Villagrán¹

(1) Laboratorio de Palinología, Departamento Biología, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. Casilla 653, Santiago. rvillama@icaro.dic.uchile.cl.

(2) Departamento de Geografía Física, Universidad de Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern, Suiza.

Titulo acortado: El Holoceno tardío en la costa de Chile central

Resumen

En este trabajo se presenta un registro de alta resolución temporal de polen, microalgas y carbón de Laguna Matanzas (33°45-46 S; 71°40-42' W), el cual documenta el cambio climático vegetacional durante los últimos 3000 años en la costa de Chile central. Nuestros resultados indican que a una fase inicial con altas proporciones de Gramineae y Cyperaceae, y trazas de polen arbóreos y otras herbáceas, sigue un incremento de Chenopodiaceae, lo que sugiere un cambio entre 2900 y 2500 años cal A.P desde condiciones de mayor humedad hacia secas. Entre 2500 y 1300 años cal A.P., el

aumento de las proporciones de polen arbóreo, Gramíneae y microalgas, implica un nuevo aumento de las precipitaciones en el área. Sin embargo, las fluctuaciones en los valores de acumulación de polen, microalgas y carbón durante todo el lapso, sugieren una elevada variabilidad en las precipitaciones. Entre 1300 y 600 años cal. A.P., las tasas de acumulación muestran un abrupto descenso de todos los taxa. Una elevada heterogeneidad de los sedimentos sugiere varios eventos de depositación de dunas que culminó con el cierre de la conexión marítima de Laguna Matanzas. El registro de polen documenta después de 600 años cal A.P., el establecimiento del bosque costero en el área. La presencia de cerca de 20 eventos de inundación indicados por la sedimentología y los indicadores biológicos sugieren momentos de mayor descarga hacia la laguna, e implican fluctuaciones en las precipitaciones. La variabilidad climática detectada en la estratigrafía de polen y sedimentos de Chile central reafirma el postulado de que El Niño-Oscilación del Sur ha estado operando durante los últimos 3000 años.

Palabras Clave: Holoceno tardío, ENOS, Laguna Matanzas, Chile central, variabilidad climática.

Abstract

Here we present a pollen, microalgae and charcoal record from coastal central Chile (Laguna Matanzas, 33°45-46 S; 71°40-42' W), that documents high climatic variability over the last 3000 cal yr. Our results indicate initially high percentages of Gramineae and Cyperaceae pollen, along with herbs and traces of arboreal taxa, followed by an increase in Chenopodiaceae pollen and suggests a shift from a humid to more arid climate between 2900 and 2500 yr cal B.P. A precipitation increase is suggested by increases of arboreal elements, Gramineae, herbaceous and acuatics taxa between 2500 and 600 yr cal B.P. Large amplitude fluctuations of pollen, microalgae and charcoal accumulation rates suggests high precipitation variability. The abrupt descent of the accumulation rates observed in all taxa, between 1300 and 600 yr cal. B.P., was due to high variability in sediment and dune formation events which eventually closed the marine connection of this lagoon. Increases of arboreal and shrub taxa at 600 yr cal B.P. indicate the establishment of a sclerofilous coastal forest. The occurrence of 20 flooding events suggest a high precipitation variability over this interval. Sclerofilous forest has declined over the last 200 yr cal and has gradually been replaced by *Pinus* and *Eucalyptus* monocultives during last 60 yr. The High precipitation variability documented in this record strongly suggests that ENSO has influenced the climate of Central Chile climates for the last 3000 cal yr.

Keywords: late Holocene, central Chile, climatic variability, Laguna Matanzas.

Introducción

La literatura paleoclimática ha documentado que el Holoceno tardío (últimos 3000 años) ha sido el lapso más húmedo de todo el Holoceno . Un rasgo característico de este periodo son las persistentes fluctuaciones observadas en la mayoría de los registros palinológicos de Sudamérica, hecho que ha sido interpretado como una consecuencia de una mayor frecuencia e intensidad de eventos El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) . Chile central-norte (30°-34° S), a pesar de que corresponde a una de las zonas con fuerte teleconexión con ENOS , es una de las menos conocidas en términos de paleoclima.

El clima mediterráneo de Chile central (30°-38° S) se caracteriza por lluvias invernales, determinadas por la actividad ciclónica asociada a los vientos del oeste, y un periodo de sequía estival . El borde norte de esta región (30°-34° S) es caracterizado por sequías invernales episódicas . Adicionalmente, el régimen de precipitaciones está singularizado por una fuerte variabilidad interanual, parte de la cual ha sido asociada a ENOS. Durante eventos El Niño se produce un debilitamiento del Anticiclón de Pacífico Sur (APS) lo que posibilita una mayor frecuencia y penetración de los frentes de mal tiempo, predominando condiciones lluviosas en Chile central. Durante los eventos La Niña, el APS se encuentra vigorizado, predominando condiciones invernales frías y secas . Estos antecedentes acreditan que Chile central es una zona sensible y clave para monitorear variaciones climáticas en el pasado, tanto del régimen de los vientos del oeste, como de la actividad ENOS en Sudamérica.

Pocos registros paleoclimáticos en esta zona han examinado en detalle la historia de la vegetación y el clima durante los últimos 3000 años. Estudios con alta resolución temporal basados en anillos de árboles , y documentos históricos , han propuesto reconstrucciones climáticas para Chile central para los últimos 1000 años. En estos estudios destaca la marcada variabilidad de la precipitación invernal parte de la cual podría ser explicada por ENOS.

Los registros palinológicos del área sugieren predominio de condiciones húmedas durante los últimos 3 milenios. Sin embargo, la baja tasa de sedimentación determina una gruesa resolución temporal de estos registros, al tiempo que impide detectar la elevada variabilidad climática asociada a la frecuencia/intensidad de eventos ENOS durante el Holoceno tardío.

Registros sedimentológicos/geoquímicos y de polen de alta resolución temporal de Laguna Aculeo (33°50'S) en el Valle Longitudinal , y de foraminíferos bentónicos en la costa de Chile central sugieren que el clima húmedo del Holoceno tardío estuvo marcado por una fuerte variabilidad en las precipitaciones, probablemente, debido a una mayor frecuencia/ intensidad de eventos ENOS. En este trabajo se propone una reconstrucción climático-vegetacional del Holoceno tardío de la costa de Chile central, sobre la base de un registro de alta resolución temporal de polen, microalgas y carbón microscópico.

Área de estudio

Laguna Matanzas (33°45-46 S; 71°40-42' W), esta localizada a 38 Km al sur de San

Antonio (Fig. 4.1), es parte de un sistema de lagunas ubicadas cercanas al borde costero y forman parte de la Reserva Nacional El Yali.

Laguna Matanzas es alimentada principalmente por la quebrada Las Rosas y cuando existe un superávit de agua se genera un drenaje que desemboca en el mar. La laguna cubre un área de 1.5 km² y tiene una profundidad máxima de 3 m. El clima regional ha sido definido como mediterráneo subhúmedo-templado, con una temperatura media anual de 12° C y 430 mm de precipitación media anual.

El desarrollo de lagunas costeras en la costa de Chile central está relacionado con la evolución geomorfológica del paisaje litoral durante el Holoceno. Laguna Matanzas se encuentra entre distintos sistemas de dunas reconocidos en el área (Figura 4.1). Un sistema de dunas antiguas tienen edades correspondientes al Pleistoceno y Holoceno temprano, mientras que las dunas transversales y parabólicas se formaron después de la última transgresión marina del Holoceno medio.

La vegetación del área corresponde al matorral esclerófilo costero. En la ribera norte de Laguna Matanzas, el matorral está integrado por *Schinus latifolius*, *Azara celsastrina*, *Peumus boldus*, *Sophora macrocarpa*, *Luma chequen*, *Aristotelia chilensis*, *Cryptocarya alba* y *Escallonia pulverulenta*. Sobre sustratos areno-pedregosos se desarrolla un espinal de *Acacia caven*, con individuos achaparrados de baja densidad. En el entorno de la laguna misma se desarrolla una franja de especies palustres, tales como *Scirpus californicus* y *Typha angustifolia*. En sectores de suelos salinos, existe un matorral bajo de *Nolana crassulifolia* y *N. sedifolia*. Plantaciones recientes (~60 años) de especies exóticas (*Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*) se observan en los alrededores de Laguna Matanzas y Laguna Colejuda.

Materiales y Métodos

Una columna de sedimentos de 760 cm fue obtenida del sector central de la laguna, utilizando un barreno Livingstone. Se dispone de cuatro fechados radiocarbónicos para la columna de sedimentos (tabla 4.1), con una edad basal de 2785 ± 155 años ¹⁴C A.P. (760 cm). Las fechas radiocarbónicas fueron convertidas a edades calendario con el programa Calib 4.2. Con las fechas convertidas se construyó un modelo edad-profundidad (Fig.4.2), calculadas sobre la base de una interpolación lineal entre fechas, las que fueron asignadas a los niveles polínicos.

Jenny et al (2000)¹ han inferido dos ambientes de depositación de acuerdo a análisis geoquímico y composición de sedimentos. Un ambiente lagunar (760-260 cm), cuyos sedimentos corresponden a limos arcillosos (Fig. 4.3) que varían en cuanto a su color, contenido de carbonatos (salinidad) y restos vegetales; intraconglomerados y arenas limosas con intraclastos. Un ambiente lacustre (260-0 cm) de cuenca cerrada, donde los sedimentos están constituidos por limos arcillosos, limos y arenas limosas (Fig.2). En este

¹ Jenny B, J Massaferrero, B Valero-Garcés, M Geyh & A Ryzzo (2000) Evidence of salinity changes due to marine influence during the last 3000 years in Laguna Matanzas (central Chile) from sedimentological, geochemical and chironomid analyses. Paleolimnological Congress. Kingstone, Canada. Agosto 2000.

último ambiente, Jenny et al (2000)¹ han distinguido cerca de 20 episodios de inundación.

Muestras de un volumen constante de sedimento (3 cm³), extraídas a intervalos de 5-20 cm a lo largo de la columna, fueron procesadas para análisis de polen. Las muestras fueron desmineralizadas de acuerdo a técnicas estándar (KOH, HF y acetólisis;). Tabletas de esporas de *Lycopodium* fueron agregadas para calcular las tasas de acumulación de polen, esporas, microalgas y micropartículas de carbón. En cada uno de los niveles se realizaron recuentos de polen hasta completar una suma básica de 300 granos de polen terrestre. De esta suma básica fueron excluidos los taxa acuáticos, esporas de helechos y la microalga *Pediastrum*. Los porcentajes de los grupos excluidos de la suma polínica se calcularon sobre la suma total de granos contados. Los resultados son expresados en diagramas de porcentajes relativos y de tasas de acumulación (granos/cm²/año), utilizando los resultados de modelo de edades calendario. La zonación del diagrama fue corroborada a través de un análisis multivariado (DCA) del programa CONISS , aplicado a todos los taxa polínicos con abundancias $\geq 2\%$.

Resultados

Estratigrafía Polínica

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran el diagrama de porcentajes y las tasas de acumulación de polen del registro Laguna Matanzas, respectivamente. En los diagramas hemos definido cinco zonas polínicas:

Zona MA-1 (2900-2800 años cal A.P)

Dominada por altos porcentajes de Gramineae (20-55 %) y Chenopodiaceae (15-50 %), junto a bajas proporciones de otros taxa herbáceos (Compositae, Umbelliferae, Euphorbiaceae) (Fig. 4.3). Trazas de elementos arbóreos del matorral esclerófilo (*Schinus*, *Escallonia*, *Maytenus boaria*) se registran en el transcurso de esta zona junto a taxa palustres como las Cyperaceae (15-40%). La Fig. 4.4 muestra que todos los taxa registran, en este breve lapso, los máximos valores de acumulación de polen para los últimos 3000 años cal. Estos máximos están relacionados con la alta tasa de acumulación de sedimentos en la base del registro (Fig. 4.2).

Zona MA-2 (2800-2500 años cal A.P)

Las Chenopodiaceae experimentan un abrupto incremento (40-80%) asociado a una abrupta caída de Gramineae (10-30%) y los taxa palustres Cyperaceae (<20%) y *Typha* (< 5%). La planta acuática *Myriophyllum* aumenta levemente sus porcentajes. Los restantes taxa herbáceos y arbóreos no muestran mayores cambios respecto de la zona anterior. Los valores de acumulación de polen muestran una abrupta disminución en la mayoría de los taxa, siendo menor este fenómeno en Chenopodiaceae y *Myriophyllum*

que presentan un leve incremento.

Zona MA-3 (2500-1300 años cal A.P.)

Los porcentajes de Gramineae incrementan abruptamente con valores que fluctúan entre 30 y 60 %. Una conducta también fluctuante muestra el registro de Chenopodiaceae (15-65 %), a pesar de que no alcanzan los elevados porcentajes promedios de la zona anterior. Cyperaceae aumenta a valores que no superan el 20%. Los elementos arbóreos (*Schinus*, *Escallonia*, *Maytenus boaria*, *Myrceugenia*, *Azara*) aumentan levemente, respecto de las zonas anteriores, y se registran continuamente a través de la zona. Se observan incrementos en las tasas de acumulación para todos los taxa, pero con fluctuaciones notables en sus valores.

Zona MA-4 (1300-400 años cal A.P.)

En la porción inferior (MA-4 a), las Chenopodiaceae se mantienen con valores que fluctúan entre 10 y 60 %. Las Gramineae, *Myriophyllum* algunos elementos arbóreos disminuyen. *Escallonia*, Compositae y Umbelliferae experimentan un leve aumento en sus porcentajes. Durante este lapso, los valores de acumulación muestran una disminución pronunciada en todos los taxa.

En la porción superior (MA-4 b) la mayoría de los taxa herbáceos y acuáticas disminuyen sus porcentajes, mientras que las Chenopodiaceae (20-80 %) y las Cruciferae (20-50%) aumentan. Los valores de acumulación muestran un leve incremento en todos los taxa, pero las Chenopodiaceae alcanzan sus máximos valores.

Zona MA-5 (400-0 años cal A.P.)

La mayoría de los taxa aumentan sus porcentajes. Los taxa arbóreos *Schinus* (5-20%), *Escallonia* (~5%) y *M. boaria* (~5%) tienen incrementos importantes. Entre las herbáceas, aumentan las Compositae (~20%), Umbelliferae (10-15%) y Euphorbiaceae (~20 %). Entre las palustres y acuáticas aumentan Cyperaceae y *Myriophyllum* (~15%). Hacia el techo de la zona se registran los taxa exóticos *Pinus* y *Eucalyptus*, con valores de hasta 40%. La mayoría de los taxa herbáceos mantienen valores de acumulación bajos. Los taxa arbóreos *Schinus* y *Escallonia*, y el taxon arbustivo Euphorbiaceae aumentan notablemente.

Estratigrafía de microalgas y carbón

La microalga *Pediastrum boryanum* (Fig. 4.5), generalmente presente con valores de acumulación muy bajos, alcanza sus mayores valores (con notables fluctuaciones) en la zona polínica MA-3, entre 2500 y 1300 años cal A.P. Las tasas de acumulación de micropartículas de carbón son variables a lo largo del registro. El máximo de carbón ~2800 años cal. A.P., es un efecto de la rápida acumulación de sedimentos en la base del registro. A partir de este momento los valores presentan una marcada fluctuación, para luego experimentar un abrupto descenso a partir de 1300 años cal A.P.

DISCUSIÓN

El registro de Laguna Matanzas muestra altas proporciones de Gramíneas, Cyperaceae y acuáticas, junto con trazas de taxa arbóreos y otras herbáceas, en la base del registro (zona MA-1, Fig. 4.3). Este espectro polínico sugiere predominio de condiciones húmedas en el área. Los elevados valores de acumulación de polen, entre 2900 y 2800 años cal A.P. (fig. 4.4), corresponden a un artefacto debido a la rápida acumulación de sedimentos (Fig. 4.2). Entre 2800 y 2500 años cal A.P., las Chenopodiaceae experimentan un abrupto incremento y disminuye la mayoría de los restantes taxa (zona MA-2, Figs. 4.3 y 4.4). Este conjunto sugiere una disminución de la humedad durante este lapso.

Entre 2500 y 1300 años cal A.P. (zona MA-3), las Chenopodiaceae experimentan una disminución mientras que Gramineae, taxa arbóreos (*Myrceugenia*, *Azara*) y acuáticas (Cyperaceae) aumentan, indicando un aumento en la humedad. La acumulación de polen, durante este lapso, muestra notables fluctuaciones en todos los taxa (Fig. 4.4) y sugiere fuerte variabilidad en las precipitaciones. La microalga *Pediastrum boryanum* alcanza durante este lapso sus máximos valores y muestra importantes fluctuaciones (fig. 4.5). Esta microalga es un indicador de ambientes de baja salinidad, implicando cambios en la salinidad de la laguna durante este lapso.

Un rasgo notable del registro de Laguna Matanzas, es la abrupta disminución de los valores de acumulación de polen de todos los taxa entre 1300 y 600 años cal A.P. (MA-4a), en concordancia con la casi desaparición del registro de la microalga *Pediastrum*. La desaparición de *Myriophyllum*, indicador de agua dulce, y *Pediastrum* parece estar asociado a un aumento en la salinidad. Análisis geoquímicos de los sedimentos de Laguna Matanzas (Jenny et al 2000)¹ sugieren cambios desde condiciones de baja salinidad a condiciones de mayor salinidad y precipitación de carbonatos. A su vez, los sedimentos muestran una notable variación, limos arcillosos orgánicos son sucedidos por conglomerados con matriz de arena limosa que presenta reiteradas intercalaciones de conglomerados y arenas limosas con intraclastos (Fig. 4.3). Estos cambios sugieren gran actividad fluvial en la cuenca que drena hacia la laguna.

En la playa de Santo Domingo (Fig. 4.1), unos kilómetros al norte de Laguna Matanzas, Paskoff y col. han descrito cinco cordones de dunas originados por pulsos sedimentarios espasmódicos del Río Rapel. Estos pulsos habrían ocurrido, al menos, dos veces antes de 870 años cal A.P. y dos veces después de 620 años cal A.P. Los cambios en los sedimentos asociados con momentos con mayor actividad eólica y formación de dunas, podrían explicar los bajos valores de acumulación polínica entre 1300 y 600 años cal A.P.

De acuerdo con los datos geoquímicos de Laguna Matanzas (Jenny et al, 2000)¹, en torno a 600 años cal A.P. se produce el cierre de la cuenca de la Laguna, pasando desde una condición de laguna litoral a un lago de aguas salinas. Esta última condición se corresponde con las bajas proporciones de *Myriophyllum* y *Pediastrum*. El cierre de la cuenca puede estar relacionado con la depositación de dunas, fenómeno recurrente en la

costa de Chile central, como muestran los datos palinológicos y sedimentológicos de Quintero (32°47'S, . Actualmente, Laguna Matanzas se encuentra entre dos sistemas de dunas de distintas edades (Fig. 4.1). De acuerdo a , las dunas antiguas tienen edades correspondientes al Pleistoceno y Holoceno temprano. Las dunas transversales fueron depositadas después de la última transgresión marina del Holoceno medio y, probablemente, se corresponden con aquellas estudiadas por Paskoff et al. .

En concordancia con este evento de cierre de Laguna Matanzas y a partir de 600 años cal A.P., los elementos del bosque esclerófilo costero (*Schinus*, *Maytenus boaria*, *Escallonia*) y los taxa arbustivos /herbáceos (Compositae, Umbelliferae, Euphorbiaceae) incrementan sus proporciones. Este espectro sugiere la colonización y estabilización de las dunas por parte de la vegetación. Este proceso fue inicialmente expresado a través de altas proporciones de Chenopodiaceae (zona MA-4b), seguido por una expansión de los elementos arbóreos y arbustivos (zona MA-5). Después de 400 años cal A.P., las bajas proporciones de los dos taxa herbáceos característicos del paisaje anterior (Gramineae, Chenopodiaceae, Fig. 4.4) y el aumento de arbóreas sugieren el establecimiento del matorral esclerófilo en los alrededores de la actual laguna. Durante el lapso los sedimentos registran 20 niveles de inundación, lo que sugiere mantención de la variabilidad en las precipitaciones. Durante los últimos 150 años, en el registro de polen se observa la declinación de la vegetación de bosque (*Schinus*, *Maytenus boaria*, *Escallonia*), probablemente relacionada con una fuerte presión antropogénica. El auge de elementos arbóreos exóticos (*Pinus* y *Eucalyptus*), durante los últimos 60 años, sugiere la transformación del paisaje litoral por causas humanas .

El registro de micropartículas de carbón (Fig. 4.5) muestra valores de acumulación fluctuantes para los últimos 3000 años cal. El máximo basal de carbón corresponde a un artefacto causado por una mayor acumulación de sedimentos en la base de la columna. Las fluctuaciones de los valores de carbón refleja, probablemente, ocupaciones intermitentes del litoral y alrededores de la laguna por parte de poblaciones humanas prehispánicas. Los registros arqueológicos documentan la presencia casi continua de grupos humanos en el área durante los últimos 3000 años . Bajos valores de carbón después de 600 años cal A.P. podrían estar relacionados con migraciones de estas poblaciones hacia otros lugares, debido al proceso de progradación de la línea de costa a medida que se depositaban nuevos cordones de dunas.

Sobre la base de los resultados de polen, microalgas, sedimentos y carbón microscópico obtenidos, es posible postular que la variabilidad de las precipitaciones en Chile central durante el Holoceno tardío fue causada por fluctuaciones en la frecuencia y/o intensidad de las tormentas asociadas a los vientos del oeste. En Chile central, la variabilidad climática interanual (anomalías positivas y negativas de precipitación) está estrechamente relacionada con los eventos ENOS . Por ello, el reconocimiento de variabilidad en la precipitación en registros paleoecológicos de esta región es una pieza clave para determinar actividad pasada de ENOS. La notable variabilidad de los distintos indicadores, a escalas sub-centenales, observada en Laguna Matanzas, sugiere que, probablemente, ENOS ha tenido fuerte influencia sobre el clima durante los últimos 3 milenios.

Pocos registros paleoambientales de Chile central han detectado esta variabilidad

durante el Holoceno tardío. Entre ellos, los estudios de anillos de árboles, en la zona andina de la región, han demostrado que la variabilidad interanual y subcentenial de la precipitación de los últimos 1000 años esta asociada a la variabilidad ENOS . En Laguna de Aculeo (Fig. 4.1), las fluctuaciones de los valores de acumulación de polen y microalgas, y el registro de numerosos niveles de turbiditas en los sedimentos, sugieren una elevada variabilidad de las precipitaciones durante el Holoceno tardío . Asimismo, los registros de sedimentos marinos (32°45'S, muestran una marcada fluctuación en la composición de foraminíferos durante este mismo lapso. En ambos casos, las fluctuaciones de los indicadores paleoclimáticos han sido asociadas a una mayor frecuencia/intensidad de los eventos ENOS. Variabilidad en las precipitaciones, asociada a ENOS, también ha sido postulada sobre la base de estudios de paleosuelos en el Norte Chico (27°-33°S) .

Diversas fuentes de evidencia paleoclimática han sugerido que ENOS ha sido más frecuente/intenso durante los últimos 3000 años cal. Numerosos registros palinológicos de Sudamérica muestran una notable variabilidad durante este lapso, la que ha sido atribuida a una mayor frecuencia e intensidad de eventos ENOS . Sobre la base del análisis de moluscos fósiles en sitios arqueológicos de la costa peruana, se ha postulado un aumento en la frecuencia de eventos El Niño en los últimos 3200-2800 años cal . Registros geoquímicos de corales, en Papua-Nueva Guinea, indican que la amplitud de eventos El Niño durante el Holoceno tardío ha sido significativamente mayor que durante el Holoceno medio .

Los resultados de polen, sedimentos, microalgas y carbón de Laguna Matanzas nos permiten concluir que el clima de la costa de Chile central ha sido, durante los últimos 3000 años, extremadamente variable en términos de precipitación. Esta elevada variabilidad fue causada, probablemente, como ya se dijo, por fluctuaciones en la frecuencia y/o intensidad de las tormentas asociadas a los vientos del oeste. Postulamos que, esta fuerte variabilidad del comportamiento de los vientos del oeste, esta relacionada a una mayor recurrencia de eventos ENOS. Esta conclusión es concordante con la idea de que ENOS ha estado influenciando el clima de Chile central durante el Holoceno tardío.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (Fondecyt, proyecto Doctoral N° 2990012) otorgado a Rodrigo Villa-Martínez. Agradecemos a Willi Tanner, Martin Grosjean, Marc Begert por su ayuda en los trabajos de extracción de sedimentos. A la Corporación Nacional Forestal (CONAF) por su ayuda logística en Laguna Matanzas.

Literatura citada

Tabla 1: Fechados radiocarbónicos convencionales y edades calendario (2σ) de Laguna Matanzas.

Código Laboratorio	Profundidad (cm)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Edad 14C (\pm 1 Desv. Estandar)	Edad calibrada (Años cal. A.P.)
Hv- 23490	295-296	-17.7	395 \pm 120	532 (477) 306
Hv- 23497	405-411	-17.5	1440 \pm 120	1563 (1322) 1090
Hv- 23498	560-561	-16.9	2600 \pm 170	3156 (2746) 2214
Hv- 23491	812-814	-15.4	2785 \pm 155	3341 (2868) 2492

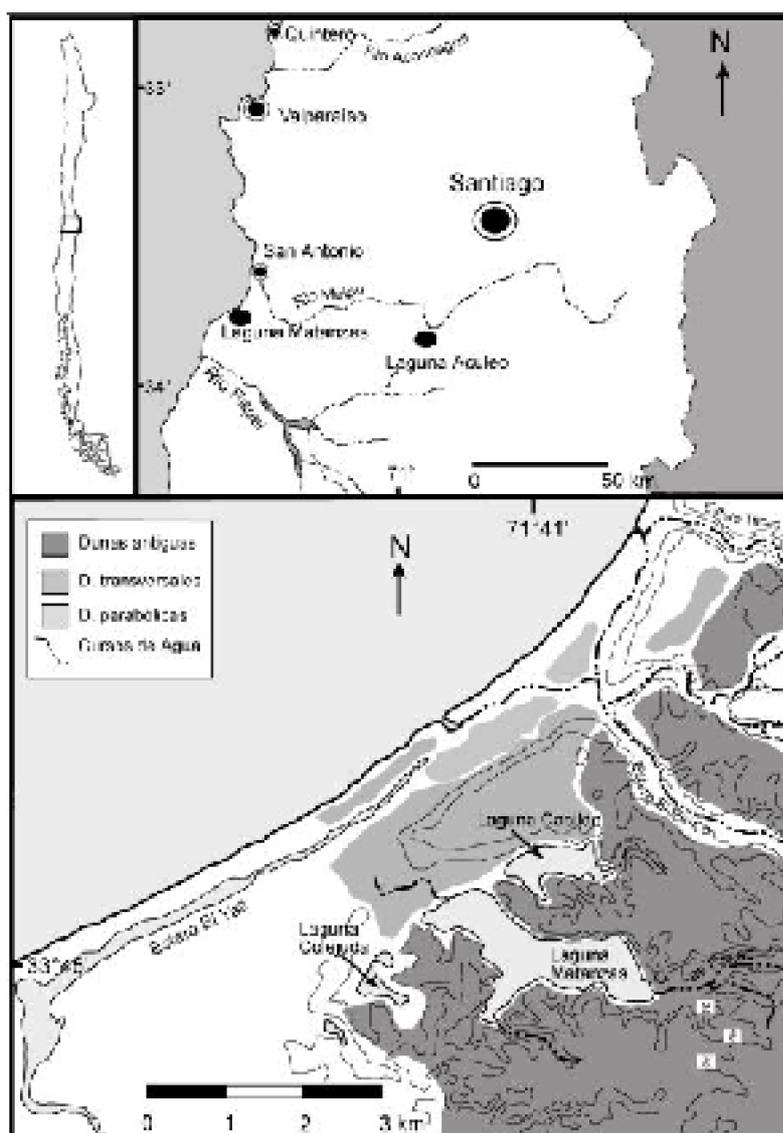


Figura 4.1: Ubicación geográfica y situación geomorfológica de Laguna Matanzas (Modificado de Castro 1984-85).

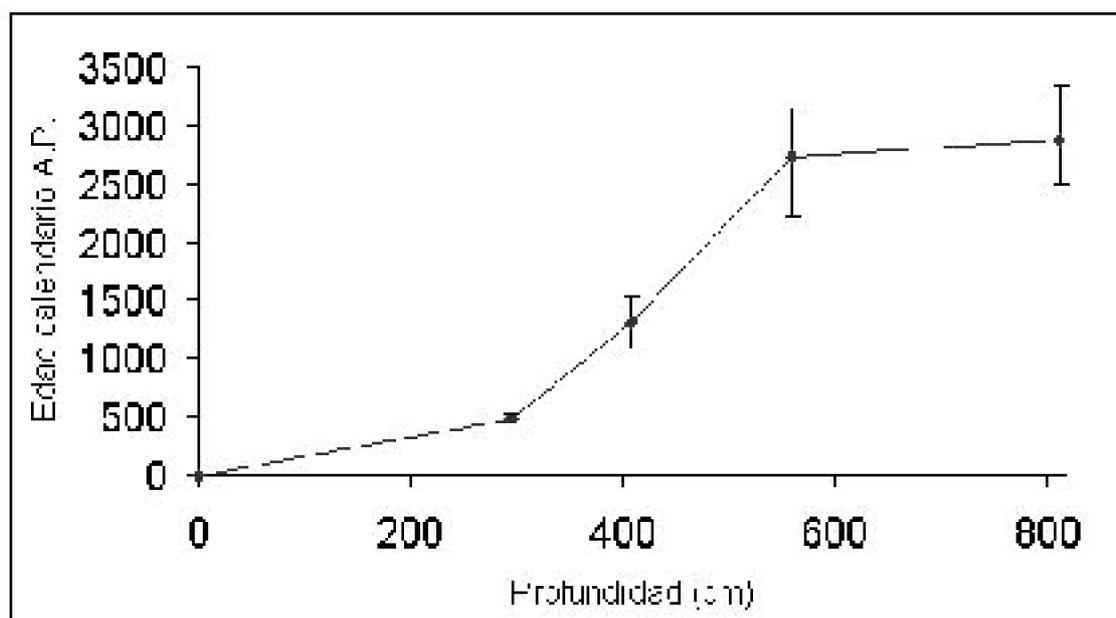


Figura 4.2: Curva de edad vs profundidad del registro de Laguna Matanzas. Las edades están dadas en años calendario antes del presente (A.P.).

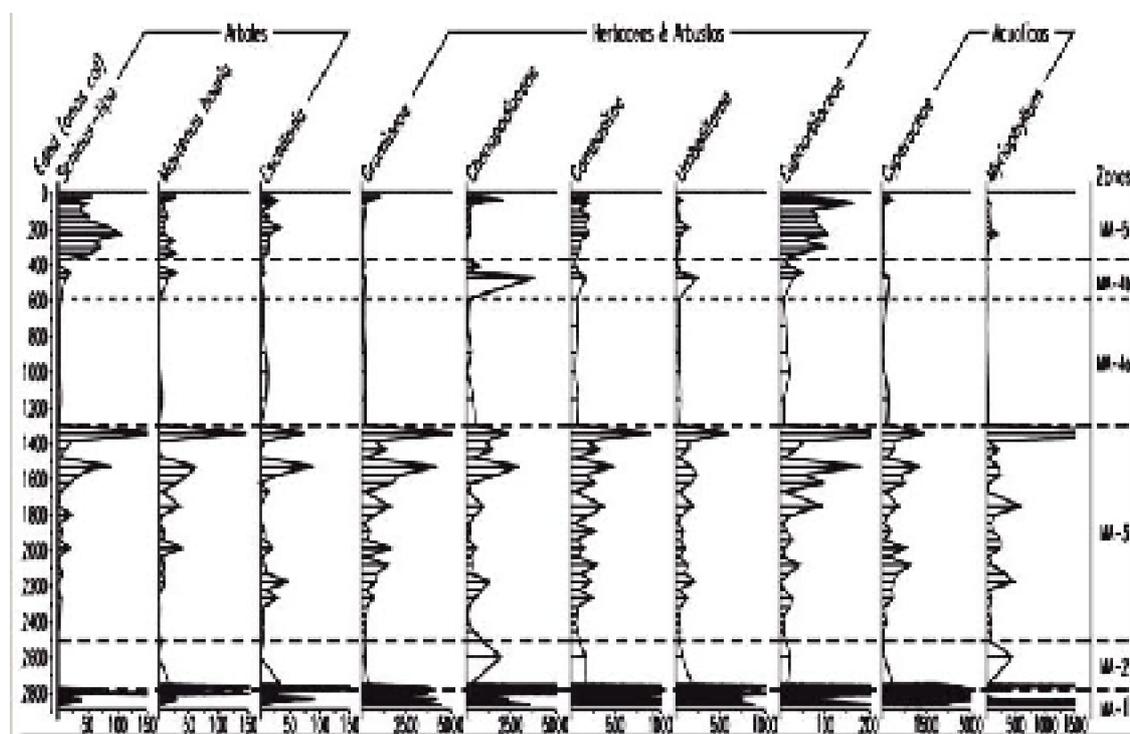


Figura 4.4: Tasa de acumulación de polen de Laguna Matanzas. Las líneas segmentadas corresponden a las mismas zonas polínicas del diagrama de porcentajes. Los valores basales (zona MA-1) han sido truncados para una mejor visualización de los resultados.

CAPITULO 5. DISCUSIÓN GENERAL

En esta tesis se evaluaron dos hipótesis explicativas o mecanismos causales para explicar la variabilidad climática del Holoceno en Chile central: a) cambios latitudinales (norte-sur) del CVW, y b) cambios en la intensidad de la circulación al interior de la zona dominada por el CVW, de manera análoga a lo que ocurre en un régimen dominado por ENOS. Los resultados de los análisis de polen, microalgas verdes, sedimentos y micropartículas de carbón, de los sitios Laguna Aculeo y Laguna Matanzas, discutidos en los capítulos 2, 3 y 4, sugieren que estos dos escenarios climáticos ocurren durante el Holoceno.

En relación con lapsos relativamente estables dominados por condiciones áridas, el registro de Laguna Aculeo muestra la ocurrencia de esta situación en el periodo anterior a 5700 años cal. A.P. (capítulo 2). La ausencia de polen y la presencia de gravas, arenas y limos con precipitación de gypsum, antes de 7500 años cal A.P., sugieren condiciones áridas y cálidas. Entre 7500 y 5700 años cal A.P., las elevadas proporciones de Chenopodiaceae, la ausencia de microalgas verdes y la depositación de limos con cantidades variables de carbonatos, sugieren presencia de un lago salino, de pequeña extensión y con altas tasas de evaporación, bajo condiciones más áridas y cálidas que en la actualidad. Estos resultados son consistentes con las predicciones que apoyan la hipótesis de un desplazamiento hacia el sur del CVW, para explicar la ocurrencia de estas fases áridas. Por otro lado, registros paleoecológicos tanto de Chile central como de Llanquihue y Chiloé muestran concordancia en la cronología y dirección de cambio climático para este lapso, validando el carácter regional de esta hipótesis.

En Chile central, los pocos registros paleoecológicos, que abarcan este tiempo, muestran también esta fase árida del Holoceno temprano a medio. Los estudios palinológicos de Quereo, Laguna Tagua Tagua (Rondanelli & Jenny, datos no publicados), de sedimentos marinos y geoquímica de sedimentos de Laguna Aculeo (Jenny et al 2002) sugieren que el inicio de esta fase árida desde comienza a inicios del Holoceno. En contraste, un estudio previo de polen fósil en Laguna Tagua Tagua, los análisis de sedimentos de la misma laguna y los estudios de paleosuelos del Norte Chico, indican que esta fase árida se inició entre 8500 y 7000 años cal. A.P (Fig. 5.1). En síntesis, las evidencias aportadas en esta tesis (capítulo 2) y los antecedentes ya discutidos, ratifican el predominio de condiciones más áridas y cálidas en el lapso anterior a 5700 años cal. A.P. en Chile central, probablemente desde inicios del Holoceno.

Concordantemente, durante el Holoceno temprano a medio, los numerosos registros palinológicos de la Región de los Lagos y Chiloé, muestran dominio del elemento arbóreo más calidófilo del bosque valdiviano durante este lapso (*Weinmannia*, *Eucryphia*), con condiciones interpretadas como más cálidas y secas. Asimismo, Lamy et al. (2001), basado en un registro de sedimentos marinos a 41°S, sugiere disminución de las precipitaciones entre 8000 y 4000 años cal. A.P. Este autor interpreta este clima como un efecto del desplazamiento hacia el sur del CVW.

Así, este cuerpo de evidencias paleoecológicas es coincidente en señalar el predominio de condiciones cálidas y secas en el centro y sur de Chile durante la primera mitad del Holoceno. Estos antecedentes permiten, entonces, apoyar la hipótesis de desplazamiento hacia el sur del CVW como mecanismo causal de la fase árida en Chile central.

El escenario opuesto puede ser inferido después de 5700 A.P. (capítulo 2). Todos los indicadores del registro Laguna Aculeo sugieren un incremento de las precipitaciones después de esta fecha. Así, el descenso del polen de *Chenopodiaceae*, el incremento de la diversidad de taxa herbáceos y arbóreos, la presencia de microalgas indicadoras de condiciones lacustres oligo-mesotróficas, la desaparición de carbonatos y aumento de la materia orgánica en los sedimentos, sugieren un aumento de la humedad. El inicio de una fase húmeda en torno a 5700 años cal A.P. sólo había sido precisado cronológicamente, en Chile central, sobre la base de fechados de paleosuelos, geoquímica de sedimentos de Laguna Aculeo (Jenny et al. 2002) y cese de la formación de dunas en Quintero (Villa-Martínez & Villagrán 1997). La baja resolución temporal y la falta de una cronología adecuada en los registros palinológicos de Quereo y de Laguna Tagua Tagua (Heusser 1990), había impedido una mayor precisión acerca de la fecha de los cambios vegetacionales que marcan esta fase. Dado que las precipitaciones en Chile central dependen de los frentes de mal tiempo asociados al CVW, el aumento de la humedad en esta área implica una mayor influencia del CVW y, por consiguiente, un posible desplazamiento hacia el norte de los mismos. Un desplazamiento similar del CVW es inferido de los registros palinológicos de Llanquihue y Chiloé. En estos registros, el reemplazo del bosque valdiviano (más cálido-seco) por el bosque Nordpatagónico (más húmedo-frío), entre 7000 y 5700 años cal. A.P., sugiere un incremento de las precipitaciones a partir de esta fecha.

Este conjunto de evidencias paleoecológicas concuerdan con un aumento de las

precipitaciones, inferido en nuestro estudio a partir de 5700 años cal. A.P. en Chile central y permiten apoyar la hipótesis de desplazamiento hacia el norte del CVW, como mecanismo causal del aumento de la humedad.

En lo que se refiere a un escenario climático afectado por ENOS, los registros estudiados son concordantes con tal influencia a partir de 3200 años A.P. (capítulos 2, 3 y 4). Desde esta fecha, las evidencias de polen fósil, sedimentos y microalgas de Laguna Matanzas y Laguna de Aculeo permiten inferir condiciones marcada por una notable variabilidad en las precipitaciones. Así, lo sugieren las notables fluctuaciones de todos los indicadores paleoclimáticos, tanto los registros de polen como de microalgas y carbón, como asimismo los tipos de sedimentos en los dos sitios estudiados. Concordantemente, todos los registros paleoambientales existentes en Chile central documentan el comienzo de una fase con mayor humedad, entre 4000 y 3000 años cal A.P. Sin embargo, la marcada variabilidad en las precipitaciones es documentada solo en los registros de paleosuelos, de foraminíferos y sedimentos marinos (Lamy et al. 1999, Marchant et al. 1999) y de geoquímica de sedimentos de Laguna Aculeo (Jenny et al 2002). Una vez más, la baja resolución temporal de los demás registros paleoecológicos ha impedido visualizar esta variabilidad (Fig. 5.1). Como se ha comentado, en los capítulos anteriores, una peculiaridad del clima actual de Chile central es la variabilidad observada en las precipitaciones (anomalías positivas y negativas), parte de la cual ha sido relacionada a fenómenos globales de circulación como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Además de las notables fluctuaciones en el registro de polen y microalgas de nuestros dos sitios de estudio, ya comentados, los sedimentos de Laguna Aculeo muestran la ocurrencia de 30 niveles con turbiditas, las cuales se generaron durante inviernos muy lluviosos, posiblemente, sincrónicos con intensos eventos El Niño. La cronología de este sitio muestra que estos eventos estuvieron ausente antes de 5700 años cal A.P., y fueron muy recurrentes durante los últimos 3200 años cal.

Este patrón concuerda con los registros de actividad ENOS durante los últimos 5700 años cal., y su intensificación a partir de 3000 años cal. A.P., documentados en numerosos estudios de polen, de moluscos de sitios arqueológicos de la costa de Perú (Sandweiss et al. 1999 y 2001), de sedimentos aluviales en Ecuador (, de análisis de corales de Papua-Nueva Guinea (, y análisis de foraminíferos en sedimentos marinos en la costa chilena frente a Valparaíso (.

Los antecedentes aportados por esta tesis y los aportes de la literatura, permiten sugerir que el clima durante el Holoceno tardío (últimos 3200 años cal.) en Chile central fue lluvioso y marcado por una fuerte variabilidad de las precipitaciones, debido a una mayor intensidad y/o frecuencia de los eventos ENOS. Así, es factible apoyar la hipótesis de que cambios en la circulación atmosférica en la zona dominada por CVW fue el mecanismo causal de la variabilidad de las precipitaciones en esta área.

En conclusión, los resultados presentados en esta tesis permiten sugerir: 1) Que el predominio de las condiciones áridas y cálidas, para el lapso anterior a 5700 años cal A.P., se debieron, probablemente, a un desplazamiento hacia el sur del cinturón de vientos del oeste. 2) Que el incremento de la humedad, entre 5700 y 3200 años cal. A.P., se debió probablemente a un desplazamiento hacia el norte de los vientos del oeste. Durante este lapso los eventos ENOS parecen haber tenido una frecuencia baja. 3) Que,

a partir de 3200 años cal A.P., el clima de Chile central fue marcado por fuertes fluctuaciones en la precipitación, durante un lapso con vientos del oeste desplazados hacia el norte, y al mismo tiempo, eventos ENOS más frecuentes e intensos.

LITERATURA CITADA