



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

PRIMERA RECONSTRUCCIÓN PALEOCLIMÁTICA CUANTITATIVA:
DEL POLEN DE MADRIGUERA AL CLIMA DEL PASADO
EN UN TRANSECTO ALTITUDINAL DEL ALTIPLANO DE CHILE,
POZO ALMONTE-SALAR DEL HUASCO.
REGIÓN DE TARAPACÁ.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓGRAFO

ANDRÉS FELIPE ZAMORA ALLENDES

Profesor Guía: Rodrigo Vargas Rona

SANTIAGO-CHILE
2013



Laboratorio de Paleocología y Paleoclima
Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas

PRIMERA RECONSTRUCCIÓN PALEOCLIMÁTICA CUANTITATIVA:
DEL POLEN DE MADRIGUERA AL CLIMA DEL PASADO
EN UN TRANSECTO ALTITUDINAL DEL ALTIPLANO DE CHILE,
POZO ALMONTE-SALAR DEL HUASCO.
REGIÓN DE TARAPACÁ.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓGRAFO

ANDRÉS FELIPE ZAMORA ALLENDES

Investigadores asesores:
Dr. Antonio Maldonado Castro
Dra. Ma. Eugenia de Porras

SANTIAGO-CHILE

2013

*“El agua lo es todo,
para nosotros es tan importante como la tierra,
con ella se bañan los bofedales,
de los bofedales a su vez se alimenta el ganado
y así sucesivamente.”*

Javier Vilca Ticuna

(Van Kessel, 1985)

*Dedicada a:
Mis Padres, Abuelos y Hermanos.
En particular a Gladys.*

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Rodrigo Vargas Rona, cuyos comentarios y sugerencias posibilitaron el desarrollo de este documento.

A los investigadores del CEAZA Dr. Antonio Maldonado Castro y Dra. Ma. Eugenia de Porras, quienes me brindaron una gran oportunidad, por haberme enseñado un mundo completamente nuevo en el desarrollo de las ciencias y por haber obtenido a través de ellos financiamiento (para realizar la memoria) de los proyectos: FONDECYT 1130279; FONDECYT 1100916 y FONDECYT 1080458.

A todos los compañeros y amigos que han estado presentes durante el desarrollo de la memoria, en especial a los que conocí en La Serena y a aquellos que aun frecuentan Santa Elvira 770.

A Camila Cisternas, quien ha sido un pilar fundamental durante la mayor parte de este proceso.

A Gladys Allendes Poblete, mi madre, a quien le debo todas las cosas que he alcanzado hasta el momento; sin tu constante apoyo y compañía nada de esto sería posible.

Finalmente quisiera agradecer a Sasha, una amiga incondicional cuya compañía y cariño recordaré por siempre.

A todos ellos, gracias.

RESUMEN

La utilización de madrigueras actuales y fósiles de roedores, permite obtener registros polínicos que reflejan adecuadamente la vegetación local en zonas áridas donde existen vacíos de información. Además la cuantificación de los rangos de distribución climática actual de cada tipo polínico permite determinar con gran precisión las condiciones paleoclimáticas a través de una función de transferencia, la misma que realiza la estimación a partir de la frecuencia relativa de polen fósil. Se presenta una reconstrucción cuantitativa de la temperatura media anual y la precipitación anual para el transecto Altiplánico ubicado entre Pozo-Almonte y Salar del Huasco, usando la función de transferencia polen-clima de los *Promedios Ponderados (PP ó WA-Weighted Averaging-*, por su significado original en inglés).

Según los resultados obtenidos, el clima imperante hace unos 10.000-10.500 años cal A.P. (Holoceno Temprano) fue 5,2°-9,5°C más frío y tuvo una precipitación 3,5-6,3mm mayor que la actual; entre 8.000 y 3.000 años cal A.P. (Holoceno Medio) los escasos registros dan cuenta de un agudo proceso de sequía cuyo *peak* se encuentra representado en torno a 3.800 años cal A.P. con una temperatura 14°C mayor y una disminución de las precipitaciones cercana a los 12mm; finalmente, los últimos 2.500 años cal A.P. se presentan como un período de gran oscilación entre momentos (más) húmedos/fríos y secos/cálidos. Este escenario es caracterizado por la mayor humedad del presente registro en torno a 2.000 y 1.000 años cal A.P. con temperaturas menores 12,6°-13°C y con un gran incremento en las precipitaciones de 8-8,1mm; luego de lo cual se instauraron las actuales condiciones de aridez.

Palabras clave: reconstrucción cuantitativa, precipitación anual, temperatura media anual, función de transferencia, polen, madriguera de roedor

ABSTRACT

The use of modern and fossil rodent midden, allows to obtain pollen records that reflect adequately the local vegetation in places with information gaps like arid zones. In addition to accurately determine the paleoclimatic conditions a quantification of current climate distribution ranges for each pollen type was performed through a transfer function using fossil pollen relative frequency. We present a quantitative reconstruction of annual mean temperature and annual precipitation for the transect Altiplánico located between Pozo Almonte and Salar Huasco using Weighted Averages (WA) pollen-climate transfer function.

According to the results, the prevailing climate for the last 10.000-10.500 cal yr B.P. (Early Holocene) was 5.2° -9.5°C cooler and 3.5-6.3mm wetter than today; between 8.000 and 3.000 cal yr B.P. (Middle Holocene) scarce records show a sharp drying process which highest peak is represented around 3.800 years cal B.P. with 14°C higher temperature and close to 12mm lower precipitation than today, and finally, during the last 2.500 cal yr B.P. a period of great oscillation between wet / dry, cold / warm conditions is described. This latter scenario is characterized by the highest humidity of the record around 2.000 and 1.000 cal yr B.P. with temperatures below 12.6°-13°C and with a large increase in rainfall of 8 to 8.1 mm, after this period the current (dry) climate conditions were established.

Keywords: quantitative reconstruction, annual precipitation, means annual temperature, transfer function, pollen, rodent midden

- ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	5
INTRODUCCIÓN.....	9
Capítulo 1: Presentación del problema.....	10
1.1 Planteamiento del problema.....	11
1.2 Hipótesis.....	16
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo General.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
Capítulo 2: Antecedentes generales.....	17
2.1 Caracterización del área de estudio.....	18
2.2 Geomorfología y geología:.....	18
2.3 Clima:.....	20
2.4 Hidrología.....	24
2.5 Vegetación:.....	26
2.5.1 Vegetación Zonal:.....	27
2.5.2 Vegetación azonal (Figura 7e):.....	29
2.6 Fauna.....	30
2.7 Caracterización humana.....	31
2.8 Antecedentes previos.....	36
2.8.1 Polen de madrigueras actuales.....	36
2.8.2 Polen fósil de madrigueras ubicadas a 3750 msnm.....	37
2.8.3 Polen fósil de madrigueras ubicadas a 3500 msnm.....	39
Capítulo 3: Marco teórico.....	40
3.1 Paleoecología y Paleoclimatología.....	41
3.1.1 Generalidades.....	41
3.1.2 Fuentes de información paleoclimática.....	41
3.1.3 Paleopalinología.....	44
3.1.4 Paleomadrigueras.....	45
3.1.5 Dataciones radiocarbónicas:.....	49
3.2 Reconstrucciones climáticas.....	49
3.3 Estado general de las estimaciones climáticas.....	50
Capítulo 4: Marco metodológico.....	52
4.1 Pasos metodológicos.....	53
4.2 Metodología general.....	55
4.2.1 Requerimientos básicos y Principales supuestos para la realización de reconstrucciones cuantitativas.....	56
4.2.1.1 Requerimientos.....	57
4.2.1.2 Supuestos.....	58
4.2.2 Promedio Ponderado, PP (<i>Weighted Averaging, WA</i>).....	59
4.2.3 Selección del modelo.....	61
4.3 Materiales.....	65
4.3.1 Reconstrucción cuantitativa con polen proveniente de madrigueras de roedores.....	65
4.3.2 Polen de madrigueras actuales.....	66
4.3.3 Clima actual.....	67
4.3.4 Calibración polen-clima actual.....	68
4.3.5 Polen fósil.....	68
4.3.6 Función de transferencia Promedio Ponderado.....	69
4.3.7 Selección del modelo.....	70

4.3.8 Variación espacial de los pisos de vegetación durante el Holoceno.	71
Capítulo 5: Resultados.....	72
5.1 Polen de madrigueras actuales.....	73
5.2 Relación del polen con el clima actual.....	74
5.2.1 Descripción climática de las zonas polínicas:	74
5.2.2 Respuesta de los principales tipos polínicos en relación al clima	77
5.3 Óptimo climático o Nicho óptimo para cada tipo polínico:.....	80
5.4 Reconstrucción de precipitación y temperatura media anual a 3.500 y 3.700 msnm:.....	81
5.5 Comparación con estimaciones climáticas previas.....	82
5.5.1 Holoceno Temprano.....	82
5.5.2 Holoceno Medio	84
5.5.3 Holoceno Tardío.....	85
5.6 Variación espacial de los pisos de vegetación durante el Holoceno.	89
Capítulo 6: Discusión y Conclusión.....	92
6.1 Discusión	93
6.1.2 Clima actual y su representación a través de la concentración polínica en madrigueras actuales:.....	93
6.1.2.1 Clima actual	93
6.1.2.2 Polen actual	95
6.1.2.3 Muestras con precipitación subestimada y temperatura sobreestimada. .	96
6.1.2.4 Muestras con precipitación sobreestimada y temperatura subestimada. .	97
6.1.2.5 Confiabilidad de la representación climática actual	98
6.1.3 Confiabilidad de la reconstrucción climática	99
6.2 Conclusiones	103
7. Anexos.....	106
7.1 Descripción general de las principales especies descritas para el área de estudio	106
7.2 Principales tipos polínicos identificados	113
Bibliografía.....	114

-ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Porcentajes del polen de madrigueras actuales y su relación con el clima actual.....	76
Tabla 2: Rangos climáticos observados y estimados cubiertos por los sitios de madriguera actual y fósil.	83

- ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Impacto hídrico sobre el desarrollo de la vegetación..... 11

Figura 2: Ubicación general del área de estudio..... 21

Figura 3: Caracterización de los principales componentes abióticos..... 23

Figura 4: Caracterización climática del área de estudio..... 24

Figura 5: Temperatura promedio anual (regional). 25

Figura 6: Distribución altitudinal y latitudinal de la vegetación..... 27

Figura 7: Fotografías de los pisos de vegetación 30

Figura 8: Diagrama de concentraciones polínicas de 9 madrigueras actuales..... 37

Figura 9 : Diagrama de porcentajes polínicos de paleomadrigueras colectadas en torno a 3750msnm. 38

Figura 10 : Diagrama de porcentajes polínicos de paleomadrigueras colectadas en torno a 3500msnm. 39

Figura 11: Esquema de depositación polínica general..... 43

Figura 12: Imágenes de roedores. 46

Figura 13: Esquema de procedencia del polen al interior de las madrigueras..... 48

Figura 14: Imágenes de amdrigueras de roedores..... 48

Figura 15: Ilustración de algunas actividades y/o hallazgos realizados en actividades de campo. 53

Figura 16: Esquema metodológico general del proceso de investigación. 55

Figura 17: Principales etapas en la reconstrucción paleoclimática. 56

Figura 18: Esquema general del proceso de reconstrucción cuantitativa 65

Figura 19: Distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas por Hijmans et al (2005). 69

Figura 20: Rendimiento del modelo matemático..... 71

Figura 21: Diagrama de concentraciones polínicas de 2 madrigueras actuales ubicadas a 3.950 y 4.050 msnm. 73

Figura 22: Diagrama de concentraciones polínicas de 11 madrigueras actuales ubicadas en un gradiente altitudinal en el transecto Pozo Almonte-Salar del Huasco.. 74

Figura 23: Gráfico de polen de madrigueras actuales y su relación con el clima actual 79

Figura 24: Gráficos con los rangos climáticos de los principales tipos polínicos..... 80

Figura 25: Comparación de la reconstrucción climática con estimaciones previas (0 a ~10.000 años A.P.) 85

Figura 26: Comparación de la reconstrucción climática con estimaciones previas (0 a ~2.500 años A.P.) 86

Figura 27: Comparación de la reconstrucción climática con estimaciones previas (0 a ~650 años A.P.)..... 88

Figura 28: Distribución de los pisos de vegetación en base a rangos de tolerancia climática de cada tipo polínico y su variación espacial en la actualidad..... 90

Figura 29: Distribución de los pisos de vegetación en base a rangos de tolerancia climática de cada tipo polínico y su variación espacial en el momento de mayores precipitaciones reconstruido por los datos de esta memoria (2.000 años A.P.) 90

Figura 30: Distribución de los pisos de vegetación en base a rangos de tolerancia climática de cada tipo polínico y su variación espacial en el momento de mayor aridez reconstruido por los datos de esta memoria (3.700 años A.P.)..... 91

Figura 31: Reconstrucción climática conjunta 101

Figura 32: Fotografía de los principales tipos polínicos identificados 113

INTRODUCCIÓN

Como los registros instrumentales del clima alcanzan a cubrir tan solo una pequeña fracción de la historia climática de la Tierra y no entregan una perspectiva adecuada para comprender los distintos procesos involucrados en la instauración de las actuales condiciones del tiempo meteorológico, ha sido necesario realizar reconstrucciones paleoclimáticas de manera indirecta a partir de verdaderos archivos naturales de origen orgánico e inorgánico a través de la **paleoclimatología**, disciplina que corresponde al estudio de las condiciones climáticas ocurridas fuera del rango temporal cubierto por mediciones instrumentales; ésta se encarga de establecer las variaciones ocurridas durante el pasado y sus datos son utilizados, generalmente, para validar modelos vinculados con procesos de cambio climático (Bradley, 1999; Cheddadi, 2005; Raper et al., 2009).

Aun cuando el estudio de las condiciones paleoclimáticas no es nuevo y en Chile se han realizado estimaciones a partir de cambios observados en la naturaleza, aún no existen reconstrucciones cuantitativas que establezcan de manera relativamente certera las variaciones climáticas ocurridas durante el pasado. Este problema es aún mayor en zonas áridas, donde las extremas condiciones geográficas dificultan los estudios paleoclimatológicos realizados con metodologías tradicionales.

Con el desarrollo y resultados de la presente memoria se presentará un estudio de la variabilidad climática ocurrida durante el Holoceno (últimos 10.000 años calendario antes del presente –años cal A.P.–) en un transecto altitudinal (3.000 a 4.300 msnm) del Altiplano chileno ubicado entre Pozo Almonte y el Salar del Huasco (20°15'S/69°06'W); dada las características metodológicas y la información generada, este trabajo constituye la primera reconstrucción cuantitativa de las variables climáticas que condicionan el desarrollo de la vida en el Altiplano: temperatura y precipitación.

Capítulo 1: Presentación del problema



1.1 Planteamiento del problema

El Norte Grande de Chile (18° - 26° S) se encuentra emplazado en una de las zonas más áridas del planeta (Becerra et al., 2001); en este lugar el desarrollo de la vida se encuentra restringido a sitios donde existe alguna fuente de agua, la que suele provenir de: a) neblinas costeras o “camanchacas”, b) cursos fluviales, c) afloramiento de la napa freática ó d) precipitaciones de verano (Marticorena et al., 1998) (**Figura 1**). Las localidades del Norte Grande, con excepción de los sectores costeros, presentan una dependencia casi exclusiva de la cantidad pluviométrica recogida en los sectores Andinos (Morales et al., 2012), lo que ha afectando históricamente la escorrentía superficial (Garreaud, 2009) y la disponibilidad de agua en los principales asentamientos humanos del Norte de Chile (Van Kessel, 19985). De este modo, la reducción en las precipitaciones de verano (Urrutia et al., 2009) y el incremento de las temperaturas predichas para fines del siglo XXI sobre el Altiplano Sudamericano tendrían un gran impacto en todo el ecosistema natural y social de estas áreas (Minvielle et al., 2011).

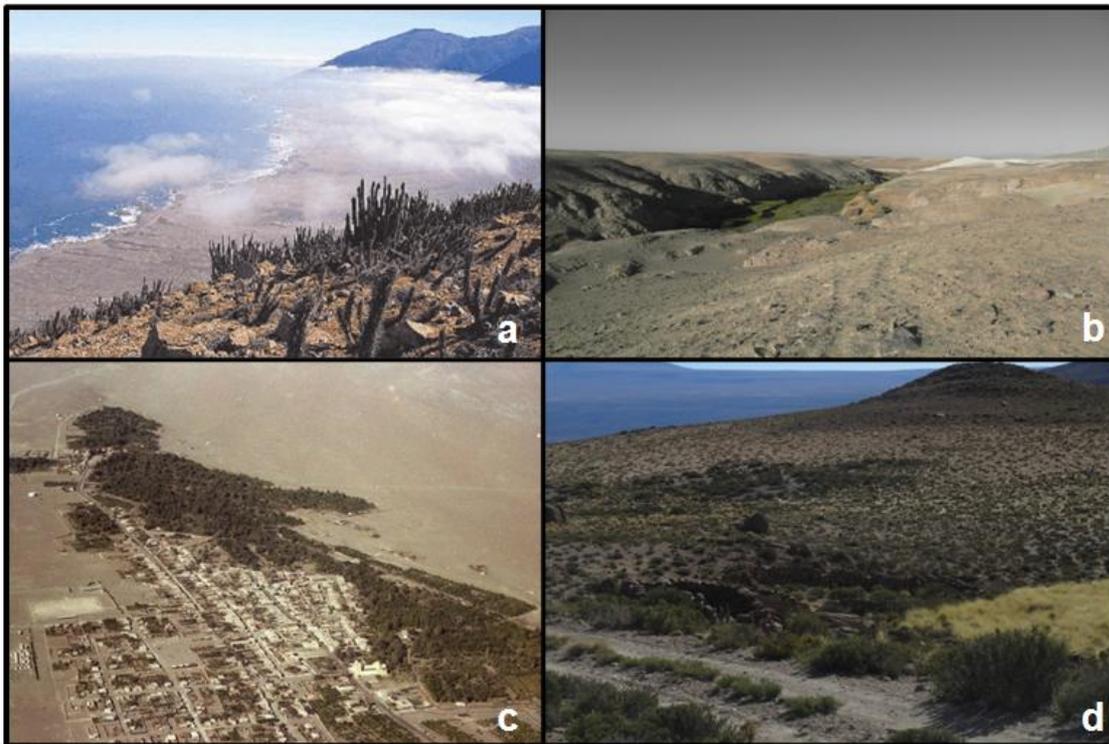


Figura 1: a) camanchaca costera (fuente: www.plataformaurbana.cl), b) cuenca del río Loa (fuente: Andrés Zamora, 2012), c) afloramiento de la napa freática en el Oasis de Pica (fuente: www.panoramio.com, usuario: Fernando Poirot) y, d) Cercanías del Salar del Huasco (fuente: Andrés Zamora, 2012)

Las implicancias espaciales asociadas a la variabilidad climática ocurrida en zonas Altiplánicas ha motivado, principalmente durante los últimos treinta años, el desarrollo de importantes investigaciones (Garreaud et al., 2003), cuyos objetivos se han orientado principalmente hacia la comprensión del comportamiento que posee el clima a durante una escala temporal variable ya que, por ejemplo, la disponibilidad del agua es uno de los factores que condicionan la disponibilidad de los recursos (Morales et al., 2012); estos trabajos son de especial importancia porque los resultados derivados de estos podrían llegar a favorecer la realización de una gestión territorial integrada con perspectivas de mediano y largo plazo (Petit et al., 2005).

La confección de escenarios climáticos futuros y la determinación del grado de impacto que estos cambios tendrían sobre los recursos se fundamenta en: a) la extrapolación de las condiciones y relaciones actuales (Prentice et al., 1996; Islebe, 1999) y b) en base a procesos de evolución evidenciados a partir de reconstrucciones climáticas del pasado (Laurent et al., 2004), por lo que se hace necesario comprender las condiciones que operan entre factores ambientales (abióticos) y orgánicos durante el presente ya que, por ejemplo, conocer las dinámicas entre clima y vegetación permitiría establecer una mejor comprensión de los procesos involucrados en el desarrollo (a una escala geológica) de esta “simbiosis” y, posteriormente a ello, realizar una validación en los modelos predictivos de cambio climático (Cheddadi et al., 2005).

La extrapolación de las condiciones y relaciones actuales se encuentra determinada por la disponibilidad de información, ya que la generación de datos modernos se encuentra sumamente restringida por las condiciones físicas del paisaje (Cavieres et al., 2001) y por el interés que determinado espacio posea sobre la esfera científica y económica (Van Kessel, 1985); este problema se acentúa en el Norte Grande y sobre el Altiplano de Chile, donde la escasa cantidad de estaciones meteorológicas (**Figura 19**) refleja una importante brecha informática en relación a otras localidades; afortunadamente, el incremento en la capacidad de análisis obtenida a partir del desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha concedido un gran avance en la comprensión del territorio (Naoki et al., 2006), y en la actualidad es posible encontrar una gran variedad de modelos, basados en la interpolación de datos climáticos (New et al., 2002; Hijmans et al., 2005; Houston, 2006; Garreaud, 2009, Uribe et al, 2012) y de vegetación (Marchant et al., 2001; Luebert et al., 2006; Ortega-

Rosas et al., 2008; Huang et al., 2010) a diferentes escalas espaciales y temporales, que permiten realizar validaciones y aproximaciones más certeras sobre los modelos climáticos (Laurent et al., 2008).

Al momento de redactar el presente documento la mayoría de los sectores Altiplánicos cuentan con el desarrollo de varios estudios de vegetación (como por ejemplo: Villagrán et al., 1981; Villagrán et al., 1983; Quintanilla, 1988; Arroyo et al., 1998; Gajardo, 1994; Marquet et al., 1998; Marticorena et al., 1998; Tellier et al., 1998; Tellier, 1999; Luebert y Gajardo, 2000; Rundel et al., 2003; Villagrán et al., 2003; Marticorena et al., 2004; Luebert y Gajardo, 2005; Navarro y Rivas-Martínez, 2005; Luebert y Pliscoff, 2006; González y Maldonado, 2010; Tellier, 2012) y clima actual (Vuille et al., 1997; Houston et al., 2003; Houston, 2006; Garreaud et al., 2009); además se han establecido estimaciones paleoclimáticas realizadas en base al análisis de diferentes *proxys* climáticos ¹ como: la concentración de materia orgánica e inorgánica en el Lago Chungará (Pueyo et al., 2011), la variación de niveles paleolacustres en el Altiplano Chileno-Boliviano (Placzek et al., 2009) y macro-restos vegetales en las cercanías del Salar de Atacama (Latorre et al., 2003). Adicionalmente se han utilizado registros de polen fósil, ya que la concentración de estos permite estimar adecuadamente la vegetación que los generó y las condiciones ambientales presentes al momento de ocurrir el proceso de depositación (Faegri et al., 1989). Los diferentes registros polínicos fueron extraídos desde, por mencionar algunos ejemplos, testigos de hielo del Volcán Sajama en Bolivia (Liu et al., 2005), testigos de sedimentos lacustres de la Laguna Miscanti, en las cercanías del Salar de Atacama en Chile (Grosjean et al., 2001) y madrigueras fósiles de roedores en un transecto altitudinal emplazado entre Pozo Almonte y el Salar del Huasco (Maldonado et al., 2012).

La gran ventaja en la reconstrucción climática a partir de la variación en la concentración polínica se encuentra en la posibilidad de comprender las conductas que la vegetación ha experimentado como respuesta a procesos de cambio climático a lo largo de la historia; sin embargo las zonas áridas de Sudamérica cuentan con escasas fuentes de información polínica las que además, frecuentemente, se

¹ Proxy climático: Es una fuente de información paleoclimática, cuya variabilidad permite realizar inferencias (de manera indirecta) de diversas condiciones ambientales del pasado; dentro de las comunes se encuentra el cambio en el ancho de los árboles, la variación en la concentración isotópica y el polen fósil.

encuentran bajo la influencia de un “efecto reservorio”², causando alteraciones en los resultados de las dataciones radiocarbónicas en los testigos de sedimentos lacustres (Geyh et al., 1999; Betancourt et al., 2000); afortunadamente las madrigueras fósiles de roedores se encuentran exentas de este problema y la datación de ellas resulta ser más certera (Betancourt et al., 2002; Maldonado et al., 2005).

La posibilidad de realizar reconstrucciones climáticas cuantitativas, y por ello más precisas, en base a la variación de la concentración polínica (Faegri y Iversen, 1989; Nakagawa et al., 2002) ha sido ampliamente aprovechada en el hemisferio Norte a una escala intercontinental (Bartlein et al., 2011), continental en Europa (Prentice et al., 1996; Davis et al., 2003; Laurent et al., 2008; Cheddadi et al., 2009), sub continental en Europa del Norte (Salonen et al., 2012) y nacional en Francia (Cheddadi et al., 2005), Marruecos (Cheddadi et al., 1998), China (Herzschuh et al., 2009; Huang et al., 2010; Jiang et al., 2010; Luo et al., 2010), Japón (Nakagawa et al., 2002), Estados Unidos (Williams et al., 1998; Wahl, 2003), México (Ortega-Rosas et al., 2008) Canadá y Groenlandia (Fréchette et al., 2008); sin embargo en países del Hemisferio Sur estas investigaciones han tenido un escaso desarrollo ya que muy pocos territorios cuentan con estimaciones paleoclimáticas cuantitativas, dentro de los que se pueden mencionar Australia (Fletcher et al., 2010), Colombia³ (Marchant et al., 2001), Argentina (Markgraf et al., 2002; Schäbitz, 2003; Tonello et al., 2009; Tonello et al., 2010) y algunas localidades del sur de Chile (Heusser et al., 1980; Heusser et al., 1981), por lo que la utilización de la información polínica contenida en los depósitos orgánicos de roedores representa una buena oportunidad para revertir esta situación.

Sin embargo, para comprender la distribución espacial que la vegetación tuvo en algún momento del pasado, a partir de polen de madriguera fósil, es necesario contar con un análogo actual que se encuentre expuesto a mecanismos de depositación similar (Birks et al., 2010): las madrigueras actuales de roedores. Recientemente De Porras et al (2011) ha demostrado que el polen de madriguera actual, en transectos altitudinales

² Definido en las páginas siguientes como la distorsión de las edades radiocarbónicas; es producida por cambios en la tasa de acumulación de isotopos de carbono debido a condiciones específicas del ambiente de depositación, por ejemplo: la gran concentración de carbonatos en ambientes lacustres del altiplano.

³ Colombia se encuentra ubicada al norte de la línea del Ecuador, sin embargo al formar parte de los países Sudamericanos fue considerado como un país perteneciente al hemisferio sur; ya que, al menos en términos del desarrollo científico, se encontraría mejor relacionado con esta agrupación de países.

del Altiplano chileno, representa adecuadamente la diversidad taxonómica local de los distintos pisos de vegetación.

En este sentido, la presente memoria realiza una reconstrucción cuantitativa de las principales variables paleoclimáticas que, en la actualidad, condicionan la presencia de la vegetación en los sectores Altiplánicos (Arroyo et al., 1998; Latorre, 2002) a partir de una función de transferencia que permite reconstruir las condiciones paleoclimáticas a través de un set de calibración polen-clima actual proveniente de madrigueras actuales; con lo que se pretende realizar un aporte en el desarrollo del conocimiento medioambiental a una escala espacial (Altiplano Chileno) y temporal (Holoceno); información que potencialmente podría ser considerada en los instrumentos de planificación local y regional. Además, la posibilidad de obtener resultados numéricamente comparables con escenarios actuales convierte al presente documento en un material pionero en el ámbito de las estimaciones climáticas, ya que no existen reconstrucciones similares, al menos en el Norte Grande de Chile; por lo tanto, estos resultados y conclusiones podrían ser utilizados para contrastar, reafirmar o refutar futuros trabajos de cambio climático que se realicen a una escala similar en las cercanías del área de estudio.

1.2 Hipótesis

1. Si el porcentaje de polen en madrigueras actuales de roedor se encuentra directamente relacionado con las variables climáticas de temperatura y precipitación, entonces la variación en la dominancia de ciertos tipos de polen fósil permitirá reconstruir cuantitativamente oscilaciones entre climas más fríos-húmedos y cálidos-secos ocurridos durante el pasado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Reconstruir cuantitativamente las condiciones climáticas que caracterizaron el paisaje del transecto altitudinal (3.000 a 4.300 msnm) ubicado entre Pozo Almonte y el Salar del Huasco (20°15'S/69°06'W) durante el Holoceno.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Reconstruir cuantitativamente las condiciones paleo-climáticas en base a variaciones espaciales de la vegetación, obtenidas a partir de registros de polen fósil.
2. Comparar la reconstrucción en base a estimaciones climáticas previas inferidas para la zona.
3. Espacializar variaciones de los distintos pisos de vegetación durante el Holoceno.
4. Incorporar nuevas madrigueras actuales, para incrementar el registro polínico actual.
5. Cuantificar los requerimientos climáticos de las principales especies descritas en los registros de polen actual.

Capítulo 2: Antecedentes generales



2.1 Caracterización del área de estudio.

El área de estudio corresponde a una sección pluridimensional, ya que se establece como una zona en donde las condiciones actuales responden a la interacción de factores a una escala temporal y espacial variable. Administrativamente, pertenece a la comuna de Pica y provincia del Tamarugal ya se encuentra en un transecto altitudinal (**Figura 2c**) (3.000 a 4.300 msnm) ubicado entre Pozo Almonte y el Salar del Huasco (20°15'S/69°06'W), emplazado en el sector Altiplánico de la región de Tarapacá, en las cercanías del límite internacional con Bolivia (**Figura 2a**). Este sector se encuentra muy próximo a la localidad Pampa de Lirima, considerada según la clasificación ecológica de Troll como la zona limítrofe sur de la Puna Seca y el extremo Norte de la Puna Salada (Troll, 1958; Nuñez et al., 1988; Marquet et al., 1998; Villagrán et al., 2003).

Los principales elementos que caracterizan este territorio se presentarán a continuación y son descritos de manera diferencial en base a la escala de influencia espacial que posee cada uno de ellos sobre el transecto, estos son la Geomorfología general según su situación sobre el Altiplano; la Geología en un marco general asociado, principalmente, a la cuenca del Salar del Huasco (**Figura 2b**); las principales características del clima a un nivel regional y local; la variación altitudinal en la composición de las principales especies que componen la vegetación; y aún cuando no existe una participación directa de las actividades humanas, se realiza una descripción general de los principales elementos socio culturales vinculados.

2.2 Geomorfología y geología:

La característica fundamental del transecto, morfológicamente hablando, se encuentra representada por el tránsito de éste sobre el cordón montañoso Altos de Pica, la cuenca del Salar del Huasco y parte del cordón oriental de la Cordillera de los Andes (**Figura 2b y Figura 3c,d**), emplazado en pleno Altiplano Sudamericano. El Altiplano es una meseta intermontana de gran altitud (aproximadamente 4.000 msnm) situada entre los 15 y 24°S de los Andes Centrales (Morales et al., 2012); limita al Este con un cordón precordillerano, cuya toponimia varía latitudinalmente, y con la Cordillera de los Andes hacia el Oeste, su gran altitud y extensión superficial son superadas solamente por el Plateau Tibetano (Allmendinger et al., 1997).

En el área de estudio, las serranías que conectan la Depresión Intermedia con los Andes se estructuran como un sector de altiplanicies elevadas sobre los 4.000 msnm que corresponde al límite occidental de esta cordillera, se encuentran emplazadas en sentido Norte-Sur y son conocidas como el cordón montañoso de los Altos de Pica; este brazo sub-andino sobrepasa los 4.200 y 4.300 msnm, y el volcán Mesozoico Yarvicoya o Columtucsa de 5.220 msnm es la mayor de sus alturas, cuya cima se observa incluso desde la Pampa del Tamarugal (Ossandon, 1992).

La cuenca del Salar del Huasco (**Figura 3b**) se caracteriza por ser una depresión altiplánica, originada por el tectonismo del Terciario Tardío. Está localizada entre el alineamiento montañoso de los Altos de Pica por el poniente y, al oriente, por la barrera de volcanes Mesozoicos y cumbres de cerros que alcanzan los 5.000 y 5.550 msnm; por el Sur limita con el sector de Huasco-Lipez y hacia el Norte con la pampa de Lirima (**Figura 2c**).

Gran parte del tramo cubierto por el transecto estudiando se encuentra emplazado sobre la macroforma solevantada denominada Altos de Pica, que corresponde a una formación mucho más antigua que la cuenca del Salar del Huasco originada durante el Terciario Tardío (**Figura 3c**); la Cordillera de los Andes, al estar asociada a un proceso genético Pliocénico, también correspondería a una unidad de mayor datación. Estudios previos reconocen como basamento o roca fundamental, la presencia de pórfidos cuarcíferos de fines del Paleozoico, y también lavas y tobas porfiríticas del Mesozoico; incluso la presencia de aportes calcáreos fosilíferos del Jurásico (Grilli et al., 1999).

La “formación liparítica” (Riolítica) constituye el aporte Cenozoico o Terciario más abundante en el sector; formado por corrientes de lavas de liparita o riolita, las que emergieron por grietas montañas durante los procesos genéticos andinos; en la actualidad estos flujos de cenizas, material piroclástico y vidrio se encuentran soldados formando estratos de gran espesor, con intercalación de material clástico (arena y guijarros) y material lahárico (barros originados por la depositación de productos volcánicos ardientes sobre hielo) (Pimentel, 1976; Ossandon, 1992; Grilli et al., 1999). La Geología del Cuaternario, presente en el área de estudio, se caracteriza por el predominio de rocas volcánicas representadas, principalmente, por lavas y brechas de composición media a básica eyectadas a través de fisuras y conos; la formación más

reciente de estos conos volcánicos determinó la actual altura de la Cordillera de los Andes, que en esta zona supera ampliamente los 5.000 msnm (Corvalán, 1965).

2.3 Clima:

La descripción de las condiciones climáticas requiere, indudablemente, la utilización de una visión sistémica que incorpore un análisis de escala regional (como mínimo), ya que las características particulares de cada lugar responden a una dinámica climática de origen global y, por tanto, no pueden ser explicadas de manera aislada. En el caso particular del área de estudio, estas variables se explican en términos generales por su ubicación sobre el Altiplano y por la influencia directa que los sectores adyacentes poseen sobre este Plateau Andino. La gran importancia del clima se debe a que es el principal factor de control en los procesos hidrológicos, especialmente en las zonas áridas, mientras el relieve y geología pueden controlar la ubicación y duración de la escorrentía superficial o recarga subterránea (Houston, 2006).

Los sectores altiplánicos de la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes se encuentran ubicados entre los cinturones de precipitación tropical y extratropical (**Figura 3a**), dando lugar al desarrollo de una zona de transición extremadamente árida (Geyh et al., 1999), caracterizada por un escenario general de escasas precipitaciones, concentradas principalmente durante la época estival en los sectores Altiplánicos y dominada por una gran oscilación térmica diaria y anual.

El bloqueo ejercido por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur Este (ASPE), la sombra de lluvias generada por la gran elevación de la Cordillera de los Andes y la disminución en la capacidad de evaporación ejercida por la Corriente fría de Humboldt son los principales factores que determinan la aridez del Norte Grande de Chile, (Houston, 2006; Garreaud, 2009). La gran Cordillera de los Andes actúa como una barrera que limita la influencia de los flujos de circulación troposférica, acentuando las diferencias existentes entre las planicies continentales hacia el Este y las costas del Océano Pacífico hacia el Oeste (Garreaud et al., 2003); la presencia del ASPE limita la influencia del sistema frontal de vientos del Oeste (*Westerlies*) responsable de las lluvias de invierno en gran parte del país; además modera la influencia de frentes tropicales provenientes del Este (Kuentz, 2009); este efecto se ve disminuido durante el verano austral, cuando el anticiclón migra hacia el Sur, posibilitando el ingreso de los vientos del Este (*Easterlies*), principal responsable de las precipitaciones convectivas estivales en los sectores cordilleranos (**Figura 3a**) (Minvielle et al., 2011);

la corriente fría de Humboldt reduce el proceso normal de evaporación superficial, generando un desecamiento del aire que incrementa las condiciones de aridez.

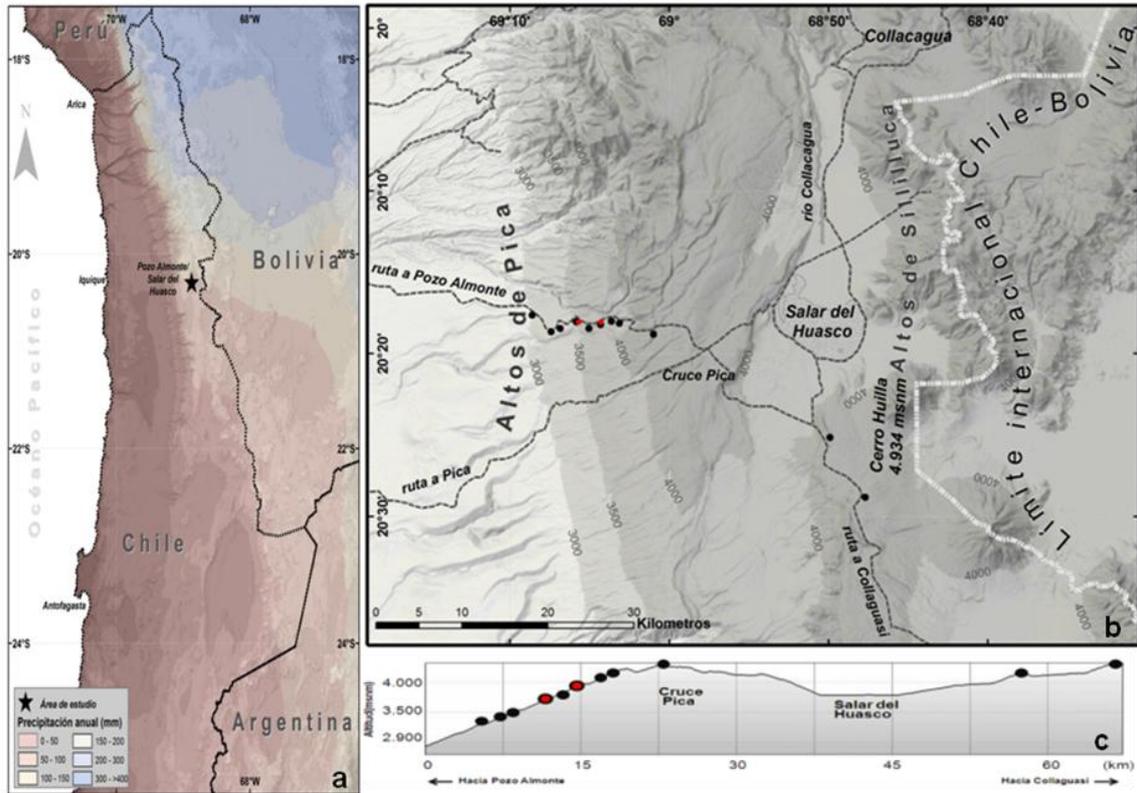


Figura 2: a) ubicación general del área de estudio en Norte Grande de Chile y su contextualización en relación a la precipitación anual (fuente: elaboración propia en a partir de Hijman et al (2005)) b) detalle del área de estudio; ubicación de madrigueras actuales (círculos negros) y fósiles (círculos rojos) y, c) perfil de elevación con la ubicación de madrigueras actuales (círculos negros) y fósiles (círculos rojos).

Las zonas altiplánicas se caracterizan por una gran oscilación térmica y lumínica diaria, mensual e interanual. Poseen un balance hídrico negativo y pluviosidad variable estacional e interanual; más del 80% de la precipitación anual total se produce durante el período de verano austral (Garreaud et al., 2003), el resto del año el Altiplano es influenciado por flujos de altitud media procedentes del Oeste caracterizados por aires extremadamente secos provenientes del Pacífico, de modo que las precipitaciones son prácticamente inexistentes (Minvielle y Garreaud, 2011) y en caso de ocurrir, éstas se producen principalmente en forma de nieve (durante los meses de invierno, Mayo-Septiembre), sin embargo no se encuentran bien registradas por las estaciones meteorológicas, lo que se ha traducido en una pobre comprensión de este fenómeno (Vuille y Ammann, 1997).

Además, mientras las temperaturas poseen un gradiente de variación en que éstas descienden con el incremento de la altitud, las precipitaciones presentan una transición que tiende hacia la disminución con el incremento en la distancia desde el origen en el núcleo de las lluvias tropicales, es decir las lluvias del Altiplano Chileno se reducen con el incremento latitudinal y la disminución altitudinal (**Figura 2a**) (Vuille et al., 2004).

El ciclo anual de inviernos secos y veranos húmedos es provocado por la expansión estacional de los vientos ecuatoriales del Este en los sectores más elevados de la troposfera; en una escala interanual se observa una tendencia hacia condiciones con más precipitaciones en todo el sector durante años La Niña y menos precipitaciones durante años El Niño Oscilación Sur (ENOS), lo que se debe al incremento en la intensidad de los flujos zonales de altura (Minvielle y Garreaud, 2011); ésta variabilidad, se encuentra principalmente condicionada por los cambios locales del flujo normal sobre el Altiplano, que se reflejan en variaciones meridionales del baroclina entre latitudes tropicales y subtropicales (Garreaud et al., 2003).

Las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio se encuentran a una distancia aproximada de 30 km lineales hacia el Norte del transecto y se ubican en las localidades de Coposa, Collacagua, Parca y Mamiña (**Figura 4a,b**); las dos primeras se encuentran hacia el Noreste del transecto y registran una precipitación promedio de 114mm anuales; las estaciones ubicadas en Parca y Mamiña, ubicadas hacia el Nor-Oeste del transecto, muestran una reducción en los montos de precipitación, los que descienden a un promedio de 27mm anuales, esto afirma cuantitativamente una reducción de las precipitaciones con el descenso de la altitud (**Figura 4c**); además es posible encontrar una relación directa entre precipitación anual y el caudal anual de los principales ríos distribuidos en la zona de influencia del Salar del Huasco (**Figura 4e**).

Los datos de temperatura son aun más escasos ya que existen muy pocas estaciones (que registren esta información) en el Norte del país, se concentran principalmente en las ciudades costeras (**Figura 19**) y cubren un reducido rango temporal, sin embargo el análisis conjunto de la información de estaciones distribuidas, espacialmente, a una escala regional permiten obtener un escenario general de la variación térmica en relación a la altitud, según lo cual se observa una franja costera (cerca a los 0 msnm) con temperaturas promedio de 19°C y, un sector altiplánico (sobre los 4.000

msnm) con temperaturas por debajo de los 6°C (**Figura 5**) (Romero et al., 2012); la estación Collacagua es la estación meteorológica con datos de temperatura más cercana al área de estudio, en ella se registra un promedio térmico de 4.5°C para el sector de interés (**Figura 4e**).

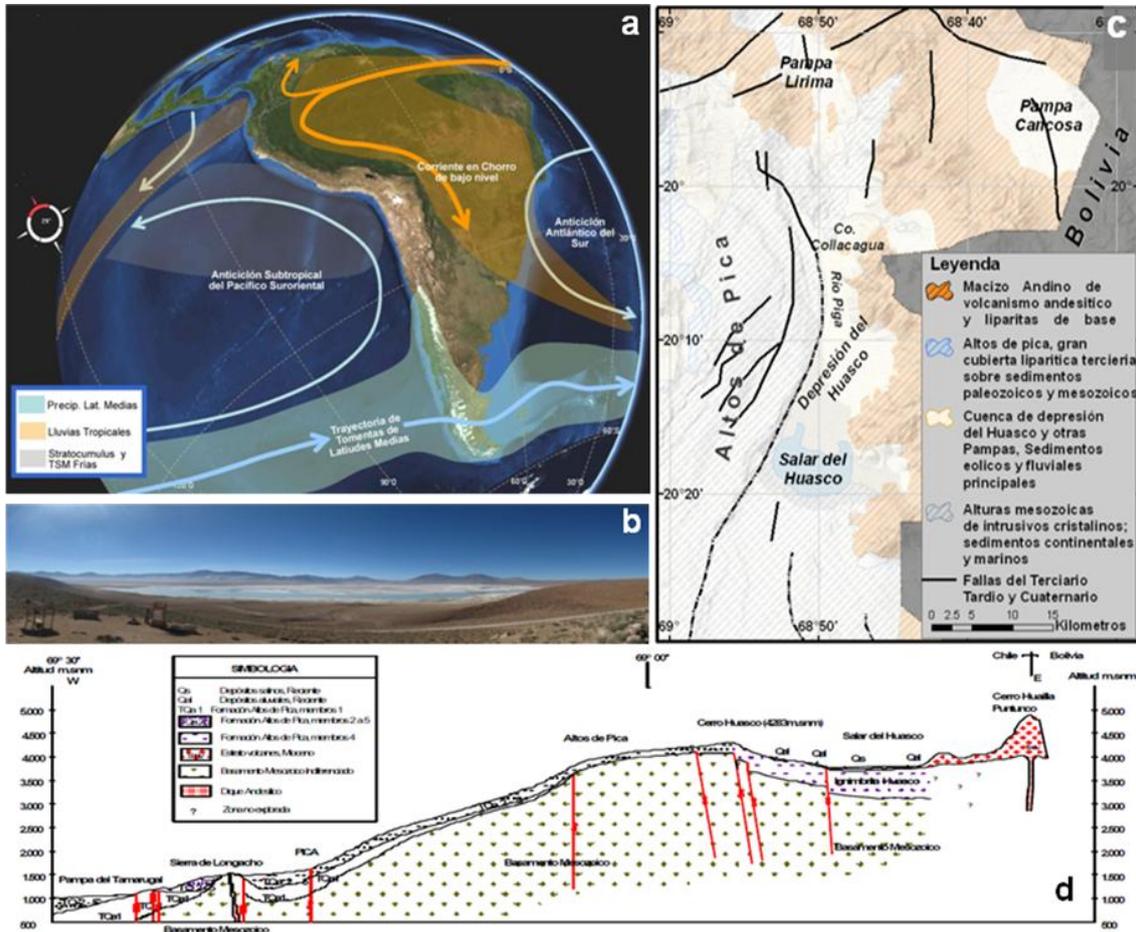


Figura 3: a) Esquema de los flujos atmosféricos de baja altitud (desde la superficie a 1.5 km.s.n.m.) y principales características del clima en América del Sur (Garreaud et al., 2009), b) fotografía panorámica del Salar del Huasco (Andrés Zamora, 2012), c) geomorfología del área de estudio (Ossandon, 1992) y, d) perfil geológico del área de estudio de estudio (Grilli et al., 1999)

La información que ha sido presentada como un promedio general se detalla gráficamente dando cuenta de la gran variación anual (**Figura 4**) de las precipitaciones y la temperatura en los sectores asociados al área de estudio; así como de una gran correlación entre los datos registrados por las principales estaciones meteorológicas (DGA), la interpolación de los datos climáticos de una gran resolución espacial (Hijmans et al., 2005) y las descripciones climáticas de las zonas Altiplánicas mencionadas en el desarrollo de este punto.

2.4 Hidrología

El curso fluvial de mayor importancia en el área de estudio corresponde a la cuenca hidrográfica del río Collacagua; se origina en el Tojo en la confluencia de los Ríos Chaquina, de caudal y pendiente baja (por el Norte), y Piga de pendiente fuerte y gran caudal, cuyas aguas de gran calidad se convierten en la principal fuente de alimentación de la cuenca. El río Collacagua en su cabecera, entre el caserío Collacagua y El Tojo, es tributado por la Quebrada Batea, el arroyo Porquesa, y algunas quebradas de flujos eventuales, luego de lo cual recibe el aporte ocasional de algunas quebradas intermitentes que se activan en época de grandes lluvias estivales; las principales quebradas son las de Peña Blanca, Millumilluri y Sillilluca. El río Collacagua alcanza una extensión total desde la cabecera a su sección distal, en la orilla Norte del Salar del Huasco, de aproximadamente 43km (DGA, 2009).

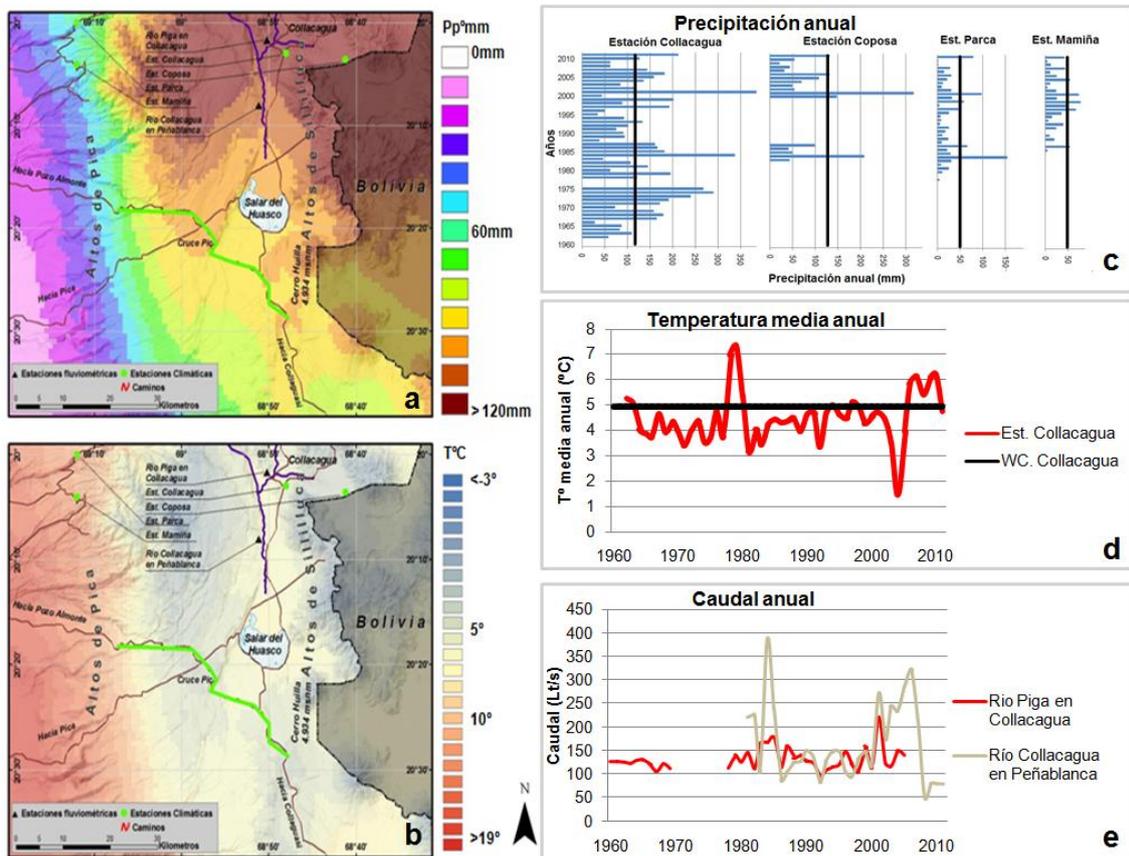


Figura 4: a) precipitación anual y b) temperatura media anual (fuente: elaboración propia en a partir de Hijsman et al (2005)) (Note que: la escala cromática difiere a la **Figura 2a**). c) Precipitación anual estación Collacagua (BNA 01050007-9), período 1962-2011, precipitación anual estación Coposa (BNA 01700009-8), período 1983-1987/2000-2011, precipitación anual estación Mamiña (BNA 01750003-1), período 1986-2011, precipitación anual estación Parca (BNA 01740001-0), período 1978-2011, d) temperatura media anual estación Collacagua (BNA 01050007-9), período 1962-2011(Fuente: DGA) y, e) caudal medio anual Río Piga en Collacagua (BNA 01050002-8), período 1960-2005, caudal medio anual Río Collacagua en Peñablanca (BNA 01050003-6), período 1981-2011.

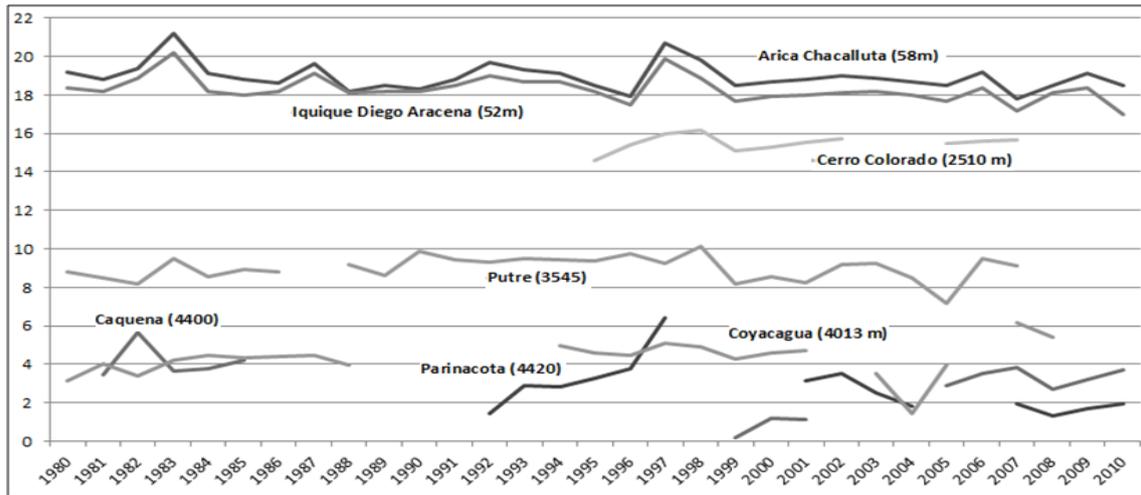


Figura 5: Temperatura promedio anual de estaciones localizadas en las regiones de Arica-Parinacota y Tarapacá. Fuente: elaborado por Romero et al (2012) a partir de datos de los Anuarios de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y de la Dirección General de Aguas (DGA).

Las aguas de la escorrentía superficial del Collacagua desaparecen por infiltración ~10km al Norte del Salar del Huasco, luego de lo cual desaguan sub-superficialmente en la cuenca del salar (Grilli et al., 1999); observaciones realizadas durante la visita a terreno en Mayo/Junio de 2012 indican una variación espacial del sitio de infiltración durante el día y la noche, posiblemente debido a un cambio en la densidad del agua subterránea producto de la gran oscilación térmica diaria, además Acosta y Custodio (2008) han inferido que el río podría desaguar directamente sobre el salar durante los meses de enero, febrero y marzo; por lo anterior es posible asumir una variación interanual desde un carácter endorreico durante la época estival hacia uno potencialmente arreico parcial el resto del año.

El Salar del Huasco es una cuenca de aproximadamente 1.500km² y corresponde al único gran cuerpo de agua presente en la zona de interés; se encuentra en una depresión Altoandina ubicada entre el Cordón Occidental (Altos de Pica) y el Cordón Oriental de la Cordillera de los Andes, en la denominada “Franja de los Salares” Andinos (Grilli et al., 1999), la cuenca del salar es un “ecosistema de gran interés que alberga algunas conspicuas especies endémicas, como flamencos, gansos andinos o trepadores, y es un sitio crucial para el descanso y anidación de aves migratorias del hemisferio Norte” (Acosta y Custodio, 2008).

La conexión de la cuenca del río Collacagua y el Salar del Huasco se asume a partir de un posible enlace subterráneo a través de la falla geológica que separa los

depósitos aluviales de la zona baja de la cuenca con la formación Ignimbrita Huasco sobre la cual se emplazan tres vertientes de agua dulce ubicadas en el borde Oeste del salar (vertientes Potrero, Hermitaño y Corriente), dando origen a la existencia de lagunas someras que serían el reflejo de una falla geológica como principal vía de conexión entre el flujo subterráneo del Collacagua y la cuenca del salar (Grilli et al., 1999).

2.5 Vegetación:

Al igual que en la mayoría de las zonas altiplánicas, sin considerar la acción antrópica, la temperatura y la precipitación serían las principales causas que condicionan la distribución y el tipo de vegetación actual (Arroyo et al., 1998; Latorre, 2002); las precipitaciones se concentran durante los meses de mayor eficiencia térmica originando una condición de aridez relativa y un corto período vegetativo (Gajardo, 1994), recordando la influencia tropical sobre el Altiplano (Di Castri et al., 1976); durante el resto del año las extremas condiciones térmicas y casi nulas precipitaciones se han traducido en el desarrollo de comunidades biológicas dominadas por una escasa diversidad específica y alto grado de endemismo (Moreno et al., 1994; Marquet et al., 1998)

A grandes rasgos la vegetación Altiplánica se puede resumir en tres tipos biológicos fundamentales: plantas pulvinadas o en cojín, gramíneas cespitosas (pastos duros o “coirones”) y los arbustos de follaje reducido o “tolas” (Gajardo, 1994); la dominancia de cada uno de estos tipos, o alguna especie asociada a ellos, varía con la altitud y da origen a la existencia de algunas unidades de vegetación descritas por varios autores (como por ejemplo: Villagrán et al., 1981; Villagrán et al., 1983; Quintanilla, 1988; Arroyo et al, 1998; Gajardo, 1994; Marquet et al., 1998; Marticorena et al, 1998; Tellier et al, 1998; Tellier, 1999; Luebert y Gajardo, 2000; Rundel et al, 2003; Villagrán et al., 2003; Marticorena et al, 2004; Luebert y Gajardo, 2005; Navarro y Rivas-Martínez, 2005; Luebert y Pliscoff, 2006; González y Maldonado, 2010; Tellier, 2012); sin embargo, dentro de la gran variedad de trabajos realizados en la zona altiplánicas, los de González y Maldonado (2010), Tellier et al (1998) y Villagrán et al (1983 y 2003) cobran especial relevancia ya que estos, por su cercanía, se encuentran directamente vinculados con el transecto estudiado. A continuación se describen los pisos de vegetación Desértico, Prepuneño, Puneño, Altoandino y Subnival (zonales) (**Figura 6**),

además se incluye un piso transicional Puneño/Altoandino mezclado con *Polylepis tarapacana* y la vegetación vinculada con cuerpos y cursos de agua (ó Azonal).

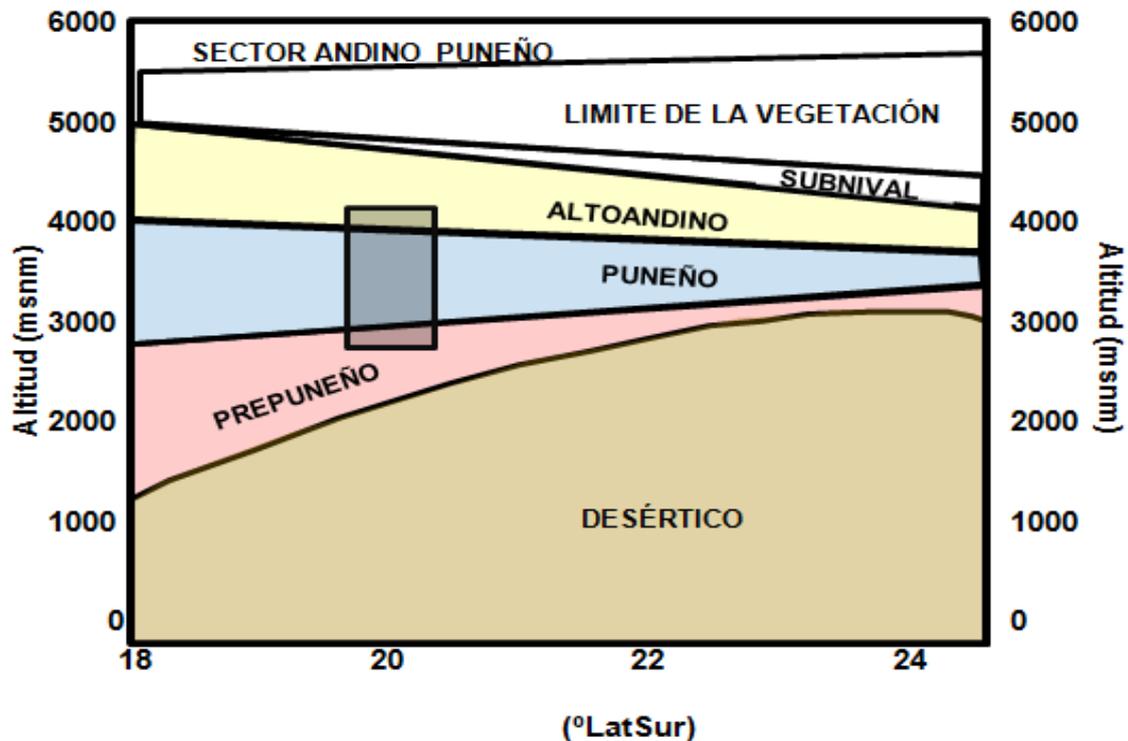


Figura 6: Distribución altitudinal y latitudinal de la vegetación en el Norte de Chile, Villagrán (1983), el cuadro negro señala la ubicación el área de estudio.

2.5.1 Vegetación Zonal:

Piso Desértico (1.000-2.500 msnm):

Morfológicamente corresponde al Matorral bajo Desértico y se encuentra dominado exclusivamente por montículos de *Atriplex madariagae* (cachiyuyo) y *Caesalpinia aphylla* (retama).

Piso Prepuneño (Figura 7a) (2.500-3.200 msnm):

Presenta una agrupación dispersa de herbáceas asociada a las precipitaciones de verano (“*pastos de lluvia o de temporal*”) compuesto por *Nolana tarapacana*, especies de *Cistanthe*, *Tiquilia atacamensis*, *Sisymbrium lanatum*, *Cristaria dissecta*, *Tarasa operculata*, *Cryptantha parvifolia* y *Tetragonia microcarpa*. A 2.900 msnm aparece *Atriplex sp.* (piyaya), arbusto pequeño característico de este piso en otras regiones andinas.

Piso Puneño (Figura 7b) (3.200-3.800 msnm):

La especies dominantes de este piso varían con la altitud y el sustrato, siendo las más importantes *Adesmia melanthes*, *Fabiana squamata* y *Junellia seriphioides* en sustrato rocoso y exposiciones Norte-Noreste; *Parastrephia lucida* domina en lugares con mayor humedad, como cursos fluviales o salares y, *Lampaya medicinalis* en los arenales; dentro de las principales especies acompañantes a 3.200 msnm destacan *Adesmia spinosissima* (añawa), y una cactácea en cojín, *Opuntia Camachoi* y *F. ramulosa* (kipa). El estrato herbáceo está dominado por especies como *Tagetes multiflora* (soiko) y varias especies de *Descurainia* (kashawe). Desde los 3.600 msnm comienza a aumentar, gradualmente, la riqueza de arbustos con especies como *Baccharis boliviensis* (monte paloma), *B. tola*, *B. santelices* (nakas) y *Parastrephia quadrangularis* (siput'ula). Destacan las poblaciones de *Fabiana squamata* (orqokipa u orqo kipa't'ula) y *F. denudata* (khachukipa), *Parastrephia lepidophylla* (chijarwalla), *P. lucida*, *Lampaya medicinalis* (lampaya) y *Chuquiraga atacamensis* (chaklampa); en menor proporción *Anatherostipa venusta* (paja k'isi).

Piso de Puneño/Altoandino mezclado con *Polylepis tarapacana* (Queñoal) (Figura 7c) (3.800-4.400msnm):

Denominado localmente “queñoal”, este piso se asocia a la presencia de rocas ignimbríticas y afloramientos graníticos. Corresponde a una formación mixta de árboles de la especie *P. tarapacana* (queñoa) que alcanzan hasta 3 m de altura insertos en una matriz general de matorrales bajos o “tolas”. Las principales especies acompañantes son los cojines de *Azorella compacta*, *Pycnophyllum molle* y *Pycnophyllum bryoides*; entre los arbustos se encuentran *Senecio nutans*, *Adesmia melanthes*, *Chersodoma candida* y *Baccharis tola* (Tellier, 1998); en las cercanías del Salar del Huasco las principales especies de pastos duros son *Stipa pogonathera* y *Festuca chrysophylla* (González y Maldonado, 2010), éstas podrían estar, eventualmente, acompañando las poblaciones de *P. tarapacana*.

Piso Altoandino (Figura 7d) (3.800-4050 msnm):

A 3.800 msnm la aparición de la primeras “pajas” marca la transición de especies donde interactúan el matorral y pastos duros con predominancia de *Festuca chrysophylla* (paja brava), *Anatherostipa venusta*, *Stipa chrysophylla* (pajas k'isi) y pequeñas champas de *Nassella nardoides* (khachu). Los arbustos que acompañan a las pajas se encuentran representados por *Parastrephia quadrangularis* (siput'ula), *P.*

lucida (umat'ula) y *Adesmia spinosissima* (añawa). A partir de los 4.000 msnm la predominancia está dada casi completamente por pastos duros, sin embargo en los substratos arenosos es frecuente el subarbusto *Senecio aff. puchii* (chachacoma de burro) y en sectores rocosos abundan los cojines de *Azorella compacta* (yareta), *Pycnophyllum bryoides* (yaretilla), *P. molle* (ayro), *Junellia tridactyla* (khachujanki), algunas *Adesmia aff. Subterranea* (añawayaya) y *Fabiana squamata* (orqokipa u orqo kipa't'ula). En arenales es común encontrar hierbas en roseta como *Astragalus cryptanthus* (garbanzo), *Moschopsis monocephala* (tanitani) y *Phacelia setigera* (wariñuño). Bajo las peñas, crece *Calceolaria stellariifolia*. Además, según (Tellier, 1998) se pueden distinguir dos unidades: la primera se encuentra dominada por *Festuca chrysophylla* y acompañada por *Stipa nardoides*, *Senecio puchii*, *Deyeuxia crista*, *Pycnophyllum bryoides* y *Opuntia ignescens*; en suelos rocosos comparte la dominancia con *Anatherostipa venusta* y *Azorella compacta*. En laderas de solana se agrupa con arbustos como *Parastrephia quadrangularis* y *Baccharis tola*, en umbría con *Stipa frígida*, *Nototriche auricoma* y *Pycnophyllum macropetalum*. La segunda unidad se encuentra dominada por *Stipa nardoides* y es característica de los sectores más planos, ésta es acompañada por arbustos en cojín como *Junellia tridactyla*, la hierba *Trichocline deserticola* y arbustos de *Adesmia melanthes*, *Senecio nutans* y *Parastrephia quadrangularis*.

Piso subnival (sobre 4050 msnm):

La cobertura vegetal es muy baja y discontinua, generalmente pampas homogéneas de *Nassella nardoides* (khachu) o definitivamente ausente.

2.5.2 Vegetación azonal (Figura 7e):

Vegetación asociada a cuerpos y cursos de agua observada sobre los 3.700 msnm, en los riachuelos de los salares y quebradas, localmente conocidos como bofedales se encuentran dominados por hemicriptófitas pulvinadas como *Distichia muscoides*, *Oxycloe andina*, *Scirpus* spp., y poaceas como *Festuca hypsophylla*, *Festuca desertícola*, *Deyeuxia curvula* y *Deyeuxia chrysantha*. En los sectores más distantes al agua se observan extensos cojines de *Distichlis* (chicha) y *Frankenia triandra* (anki). Las champas ribereñas están conformadas, básicamente, por: *Lobelia oligophylla*, *Lilaeopsis macloviana* (llach'uo istru) y *Mimulus glabratus* (oqororo o berro). En la superficie del agua es posible encontrar especies de *Ruppia*, *Myriophyllum*,

Potamogeton, *Zannichellia*, las diminutas plantitas errantes de *Lemna* y *Azolla*, *Oxychloe andina* (pako), *Scirpus* spp, especies de *Werneria* (katare), diversas poaceas palustres (Awa) y hierbas en roseta, tales como *Plantago tubulosa* e *Hypochaeris taraxacoides* (psike).



Figura 7: Fotografías de los pisos de vegetación a) Prepuneño, b) Puneño, c) Puneño/Altoandino, d) Altoandino y, e) vegetación azonal, bofedal asociado al Salar del Huasco. (Andrés Zamora, junio 2012)

2.6 Fauna

En la zona Altoandina del Norte Grande existe un total de 164 especies de vertebrados, de las cuales 115 son aves, 35 mamíferos, 8 reptiles y 6 anfibios; de este total sobresalen los roedores, con 22 especies, y las aves con un gran endemismo (Jaksic et al., 1997). En el área del Salar del Huasco se han identificado al menos las siguientes especies de Mamíferos: Tuco-tuco (*Ctenomys fulvus*), Vizcacha (*Lagidium*

viscacia), Zorro culpeo (*Pseudalopex culpaeus*) y Vicuña (*Vicugna vicugna*); Reptiles: Lagartija (*Velosaura aymararum*) y Sapo peruano (*Telmatobius peruvianus*); Aves: Flamenco andino (*Phoenicoparrus andinus*), Flamenco chileno (*Phoenicopterus chilensis*), Flamenco James (*Phoenicoparrus jamesi*), Ñandú o Suri (*Pterocnemia pennata tarapacensis*), Perdiz de la puna (*Tinamotis pentlandi*), Guayata (*Chloephaga melanoptera*) y Gaviota andina (*Larus serranus*); Peces: Karachi (*Orestias agassissi*) y Bagre (*Trichomycterus cf. rivulatus*), muchas de las cuales se encuentran en estado de vulnerabilidad o peligro de extinción y han sido incorporadas a los catálogos de comercialización CITES (CED, 2005); los sectores Altiplánicos concentran un gran número de especies endémicas, se caracterizan por una importante fragilidad ecológica y un alto grado de intervención antrópica, resultando ser un sitio de especial interés para la conservación y preservación de la biota (Jaksic et al., 1997).

2.7 Caracterización humana

La descripción del área de estudio, desde el punto de vista de sus implicancias sociales se abarca desde una óptica local que trata sobre los asentamientos humanos de los sectores Altiplánicos y en particular sobre los caseríos emplazados en las cercanías del Salar del Huasco; desde una aproximación realizada a partir de la importancia que las aguas del Altiplano poseen para el sector urbano e industrial a nivel regional; y desde los conflictos existentes por la potencial utilización de los recursos hídricos de la cuenca del Salar del Huasco.

El desarrollo de las actividades humanas en el Altiplano se ha visto históricamente influenciado por las extremas condiciones climáticas, en particular por la gran variación anual e interanual de la disponibilidad de agua (Nuñez et al., 2002) de modo que los distintos grupos humanos, de origen principalmente Aymara, han desarrollado técnicas de producción agrícola y ganadera de tipo extensivo en el espacio (y en el impacto), lo que les ha permitido adaptarse adecuadamente a este sector, transformándolo en su territorio. Como las lluvias episódicas representan la mayor fuente de agua para el consumo humano, la agricultura y la ganadería (Garreaud et al., 2009) estos modos de producción (y de vida) son extremadamente sensibles a la escasez de agua y períodos de sequía (García et al., 2003).

Durante finales de “los ochenta”, la población Altiplánica de Chile correspondía a un 3% del total regional (Van Kessel, 1985) y a principios de los años noventa se

estimaba que las potencialidades agrícolas y pecuarias como base del desarrollo y la cosmovisión cultural de los habitantes del Altiplano se verían muy perjudicadas si se exponían a un proceso de disminución hídrica severa (Guerrero, 1994); posteriormente, variaciones en las condiciones del clima reafirmaron esta teoría ya que las sequías del año 1998 causaron grandes impactos en la producción agrícola Andina de quínoa (*Chenopodium quinoa*) y papa (*Solanum tuberosum*) acompañado de un incremento en la muerte del ganado, principalmente llamas (*Lama glama*) y ovejas (*Ovis spp.*), porque la escasa disponibilidad de agua permitía satisfacer casi exclusivamente las necesidades de consumo humano (Morales et al., 2012).

En la actualidad, el principal grupo humano del área de estudio y los sectores circundantes se encuentra compuesto por tres “unidades familiares”: la familia Lucas-Ticona conformada por la Sra. Demetria Ticona Ticona y sus hijos, el Sr. Pedro Lucas Ticona y la Srta. Margarita Lucas Ticona quienes viven permanentemente en el sector Laguna (al Norte del Salar del Huasco), allí llevan a cabo actividades asociadas a la cría de ganado camélido y ovino en conjunto con actividades turísticas y de educación ambiental. La segunda unidad, la familia Choque no reside permanentemente en la localidad y solo realiza visitas esporádicas al sector Huasco Lipez (ubicado en la orilla Sur del salar) cada dos o tres meses para cuidar el ganado. El tercer asentamiento humano, ubicado en el caserío de Collacagua, se encuentra habitado casi permanentemente por el Sr. Timoteo Ayavire Cáceres, quien es visitado periódicamente (cada quince días o una vez al mes) por sus hermanos; el señor Ayavire se dedica al cuidado de su ganado y es el encargado de mantener en operación la estación meteorológica Collacagua (Moreno, 2011).

Don Pedro Lucas Ticona, uno de los habitantes permanentes del Salar del Huasco en una conversación realizada en el marco de la memoria nos cuenta que durante los meses de invierno el paisaje se encuentra completamente cubierto por nieve y las temperaturas son muy extremas, principalmente entre Junio y Julio, motivo por el cual antiguamente llevaban el ganado hacia zonas “costeras” ubicadas a unos ~3.500-3.600msnm en la vertiente occidental del cordón Altos de Pica; estos momentos eran aprovechados para realizar tareas agrícolas, en las cercanías del Oasis de Pica, dirigidas por los adultos capaces de identificar los mejores momentos de siembra y cosecha según las fases de la luna y la posición de las estrellas, por ejemplo “*la luna*

nueva se siembra y salen bonitas plantas"; paulatinamente hacia el mes de Agosto *"comienza a haber un poco de sol"* y las temperaturas se hacen más amigables.

Don Pedro posee alrededor de 450 cabezas de ganado compuestas por llamas (*Lama glama*), ovejas (*Ovis spp.*) y alpacas (*Lama pacos*), de las cuales vende un máximo de diez al año, algunas mueren por el frío al caerse a las gélidas aguas del salar durante los crudos meses de invierno o son atacadas por algunos zorros (*Pseudalopex sp.*) y las otras se utilizan para el consumo propio y para asegurar la disponibilidad futura.

La familia Lucas Ticona posee una cosmovisión del mundo en la que ellos son parte de un todo superior regido por la *"mama tierra y el tata inti"*, por lo que la utilización del territorio y los recursos se lleva a cabo de manera armónica; realizando ceremonias de agradecimiento durante años de gran productividad y rogativas (con ofrenda de animales) pidiendo por *"la llegada de lluvias"* en años menos favorables; además durante el mes de enero se lleva a cabo el *"floreo"*, instancia en que los animales son adornados como muestra de agradecimiento por los beneficios que el ganado le entregó a la familia.

Al realizar una de las conversaciones Don Pedro nos invita a la habitación de la Señora Demetria, previa autorización de ella, para protegernos de la fría noche de finales de Mayo; la habitación es una estructura aislada que junto a otras dos de diferentes dimensiones componen la vivienda de la familia; la puerta de la construcción es una cavidad muy reducida cuya principal función es evitar la fuga del calor generado por una pequeña fogata/cocina ubicada al interior, los muros fueron contruidos con piedras unidas por una mezcla de barro, el techo se encuentra compuesto básicamente de "pajas" y en conjunto no superan los dos metros de altura. La conversación trata principalmente sobre la identificación y el uso de algunas plantas, donde por ejemplo se vuelve a evidenciar el respeto por los elementos naturales ya que la madera utilizada para hacer fuego proviene de las ramas secas de la Queñoa, en algunos casos se utiliza la madera para realizar construcciones y su corteza es preparada como una infusión utilizada para *"calmar la tos de los asmáticos y fumadores"*, la Queñoa (*Polylepis tarapacana*) es el único elemento arbóreo de las zonas Altiplánicas y en la actualidad se encuentra solo en bosquetes aislados.

Uno de los relatos da cuenta del estrecho vínculo (incluso familiar) que antiguamente existía con poblados ubicados al otro lado de la frontera; en ocasiones extraordinarias incluso podían llegar a reunirse para la realización de rogativas especiales. En la actualidad estos lazos se encuentran prácticamente ausentes, ya que el afán por ejercer soberanía nacional limitó drásticamente las comunicaciones entre estas localidades, desmembrando completamente un vínculo y modo de vida ancestral gracias a la instauración de un límite territorial virtual (comunicación personal).

Las extremas condiciones de vida que han debido soportar estas poblaciones y la reciente presión ejercida por los núcleos urbanos se refleja en un acelerado proceso de migración hacia las ciudades de Calama, Iquique o algunos oasis del desierto (como Pica y Matilla); gracias a este fenómeno se teme la potencial pérdida del patrimonio cultural inmaterial de estas comunidades (Villagrán et al., 2003). Hoy en día la Señora Demetria es la única integrante de la familia que maneja la lengua Aymara, sus hijos Pedro y Margarita lo utilizan solo para referirse a algunas cosas.

Los procesos de migración y mestizaje cultural no son los únicos factores que acentúan la fragilidad del sector y la disponibilidad y aprovechamiento del recurso agua surge como una de las mayores problemáticas de la zona ya que en el Norte de Chile siempre ha existido una lucha por la utilización de este recurso debido a la constante tensión entre su uso para consumo humano-rural, humano-urbano y/o productivo, principalmente minero (Van Kessel, 1985). La extracción del agua comenzó en 1913 con la explotación de los terrenos expropiados a las comunidades de Chintaguay en el Valle de Quisma con el objetivo de obtener agua; la utilización del agua dulce generó un gran deterioro en el mundo rural del sector Andino en pos del desarrollo urbano de Iquique; posteriormente, en 1922, el incremento en la demanda hace que se incorporen las extracciones subterráneas en distintos puntos de la Pampa del Tamarugal (Guerrero, 1994; Ortiz et al., 2012).

El Acuífero de la Pampa del Tamarugal es recargado con agua de origen Altiplánico infiltrada gracias a la gran permeabilidad del suelo compuesto por rocas volcánicas fracturadas formadas por coladas, brechas y tobas andesíticas en una sección hidrogeológica mayor emplazada sobre el cordón occidental de la Cordillera de los Andes. El recorrido longitudinal del flujo hidrológico cambia en sentido Norte-Sur al llegar a la Depresión Intermedia ya que la litología de la Cordillera de la Costa reduce

casi completamente el potencial de permeabilidad; estas aguas son drenadas de manera subterránea dando origen a la existencia de un gran acuífero que finalmente desemboca en la cuenca de río Loa (DGA, 2004). La recarga total, estimada, del acuífero es de 1.113Lt/s; de manera simultánea el acuífero pierde unos 1.523Lt/s debido a la evapotranspiración producida naturalmente por los tamarugos (*Prosopis tamarugo*) de la pampa y por evaporación producida sobre la superficie de los salares, donde la napa se encuentra a unos ~10mts de profundidad (DGA, 2011; Ortiz et al., 2012); considerando solamente este factor, la descarga del acuífero supera en ~400Lt/s la capacidad de recarga natural dando como resultado un balance hídrico negativo, sin embargo según el “Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos” aún es posible extraer un 5% del total del volumen embalsado en 50 años, lo que se traduce a un caudal permitido de extracción de 2.133Lt/s por un período de 20 años (DGA, 2011).

La principal fuente de abastecimiento para la población urbana de Iquique-Alto Hospicio proviene directamente del acuífero ubicado en el sector de la Pampa del Tamarugal (MOP, 2005; Ortiz et al., 2012), donde una batería de 16 sondajes extrae el recurso del sector de Camellones; sin embargo el sostenido incremento de la población Iquiqueña de 38.000 en 1940 a 180.000 personas en 2012 ha disparado la demanda hídrica a 130.613.667m³/año (4.142Lt/s), sobrepasando excesivamente la capacidad actual del acuífero (Guerrero, 1994; DGA, 2011; INE, 2012).

Como los recursos hídricos del Altiplano son de gran calidad, renovables y su aprovechamiento requiere una inversión relativamente baja, existe una alta demanda y constante presión por la utilización de estas aguas por parte de diferentes sectores (Guerrero, 1994). Las aguas de la cuenca del Salar del Huasco no se encuentran ajenas a esta polémica ya que la potencial explotación de éstas por la industria minera tendría grandes efectos sobre los procesos naturales y sociales del salar y principalmente sobre los actuales modos de vida de las localidades adyacentes de Pica y Matilla, cuyos pobladores aseguran que el utilización del recurso en sectores localizados ha generado una disminución en el caudal de las vertientes; además, según los habitantes de Pica-Matilla existe una conexión entre el acuífero del Salar del Huasco y las aguas subterráneas del Oasis (Grilli et al., 1999).

A este respecto se ha podido establecer que las aguas subterráneas alumbradas por vertientes y socavones en la localidad de Pica-Matilla muestran un estrecho vínculo con las precipitaciones estivales ocurridas sobre los 3.500msnm, en la vertiente occidental del Cordón Altos de Pica, y poseen una escasa similitud con el origen de las aguas de la cuenca del Salar del Huasco originadas a una altitud mayor en el sector Andino; esta hipótesis fue inferida a partir de la diferencia en la concentración de isotopos ambientales estables de Oxígeno y Deuterio; además, los antecedentes geológicos indican que no es físicamente posible la existencia de una conexión entre ambos acuíferos, ya que las fallas en el basamento debieran presentar una orientación Este-Oeste y los megalineamientos de esta zona se orientan de manera sub-vertical en dirección Norte-Sur (Grilli et al., 1999; Tröger et al., 2004).

2.8 Antecedentes previos.

El transecto de estudio cuenta con el trabajo realizado previamente por Maldonado y González (2012), en el que se muestra la concentración polínica en madrigueras de roedor actual (**Figura 8**) y la variación en la concentración de polen a través del tiempo en madrigueras fósiles de roedores ubicadas en torno a 3.500 (**Figura 10**) y 3.700 (**Figura 9**) msnm (**Figura 2c y anexos 1 y 2**).

2.8.1 Polen de madrigueras actuales

El diagrama de porcentajes polínicos (**Figura 8**) presenta una “regresión” altitudinal luego de los 4.000msnm, esto se debe a que el transecto atraviesa el sector de los Altos de Pica, interrumpiéndose hacia la depresión del Salar del Huasco, luego de lo cual vuelve a incrementar altitudinalmente, hacia el Sur del cerro Huilla (**Figura 2b**).

- Zona 1: entre 3.150 y 3.350 msnm el polen de madrigueras actuales se encuentra conformado principalmente por Chenopodiaceae (<40%), la que es acompañada por un menor porcentaje de *Senecio/Parastrephia* y *Baccharis*.
- Zona 2: los 3.550 se encuentran dominados por Fabaceas (tp. *Adesmia*) acompañadas por Brassicaceae (tp. *Draba*) y *Senecio/Parastrephia*.
- Zona 3: entre 3.650 y 3.750 msnm *Baccharis* representa el principal tipo polínico registrado, éste se encuentra acompañado por un porcentaje importante de *Senecio/Parastrephia* a 3.750 msnm.

- Zona 4: entre 3.850 y 4.051 msnm la dominancia general de esta zona se encuentra determinada por la presencia de Asteraceae de los géneros *Baccharis* que disminuyen y *Senecio/Parastrephia* que presenta un aumento con el incremento altitudinal. La madriguera ubicada a 3.850 msnm posee además una importante participación de Fabaceas (tp. *Adesmia*); a 3.950 msnm *Baccharis* y *Senecio/Parastrephia* alcanzan porcentajes similares y se encuentran asociadas a un gran predominio de Poaceae; la madriguera ubicada a mayor altitud en esta zona posee un claro predominio de *Senecio/Parastrephia*, que se encuentra asociado a similar porcentaje de Brassicaceae (tp. *Sysimbrium*) y Poaceae.

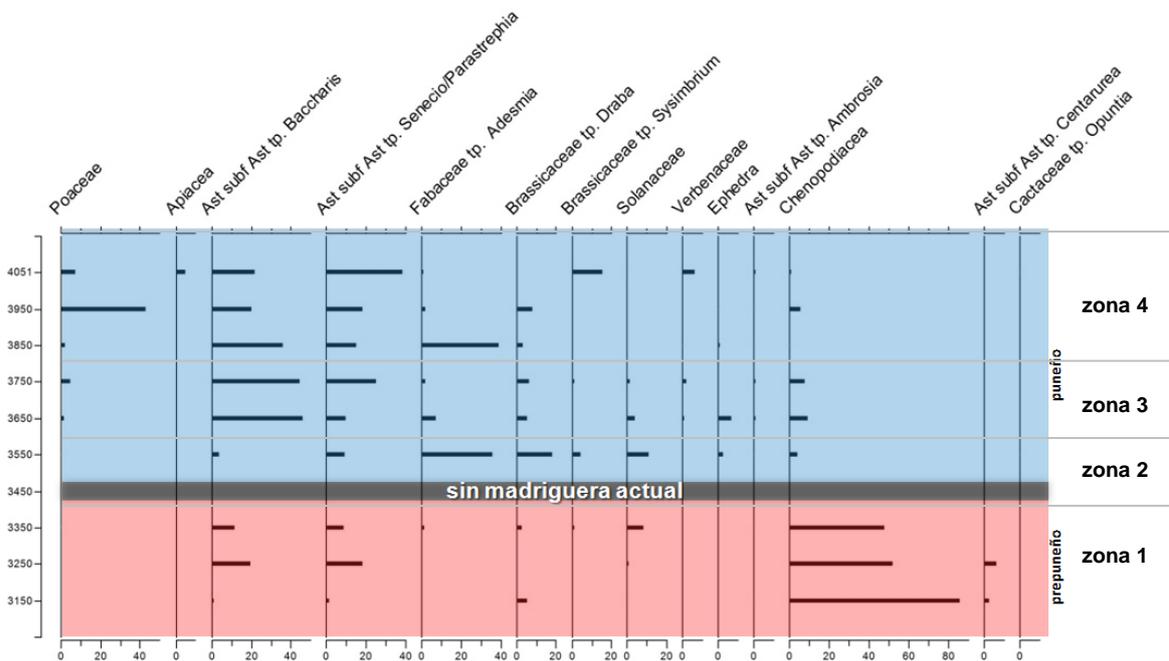


Figura 8: Diagrama de concentraciones polínicas de 9 madrigueras actuales ubicadas en un gradiente altitudinal en el transecto Pozo Almonte-Salar del Huasco.

2.8.2 Polen fósil de madrigueras ubicadas a 3750 msnm

En la **Figura 9** se muestran los porcentajes de recuentos polínicos realizados en paleomadrigueras ubicadas en torno a 3.750msnm (Maldonado y González, 2012). El diagrama obtenido ha sido dividido en 5 zonas polínicas, las que se describen a continuación desde la más antigua a la más joven.

- Zona SH-1: Corresponde a dos muestras fechadas en torno a 10.000-10.500 años A.P., y muestra el dominio polínico de Asteraceae- Asteroidea (tp.

Baccharis), y en menor proporción Asteraceae Asteroidea (tp. *Senecio/Parastrephia*) y Poaceae.

- Zona SH-2: Corresponde a paleomadrigueras del Holoceno Medio, particularmente del período comprendido entre 6000-3300 años A.P. En esta zona domina el polen de Asteraceae-Asteroidea (tp. *Baccharis*), destacando también el aumento relativo de Chenopodiaceae y descenso de Poaceae y Asteraceae-Asteroidea (tp. *Senecio/Parastrephia*).
- Zona SH-3: Corresponde a paleomadrigueras fechadas entre aproximadamente 2400-1000 años a.p, en las que destaca el aumento importante de polen de Poaceae, junto con la presencia de Asteraceae-Asteroidea y descenso relativo de Chenopodiaceae.
- Zona SH-4: Corresponden a paleomadrigueras fechadas entre aproximadamente 850-500 años A.P. y se caracteriza por el dominio de Asteraceae-Asteroidea, destacando también el aumento relativo Fabaceae y aumento gradual hacia el final de la zona de Chenopodiaceae.
- Zona SH-5: Corresponde a paleomadrigueras fechadas dentro de los últimos 500 años A.P. y se caracteriza por el dominio polínico de Asteraceae-Asteroidea y aumento significativo de Chenopodiaceae.

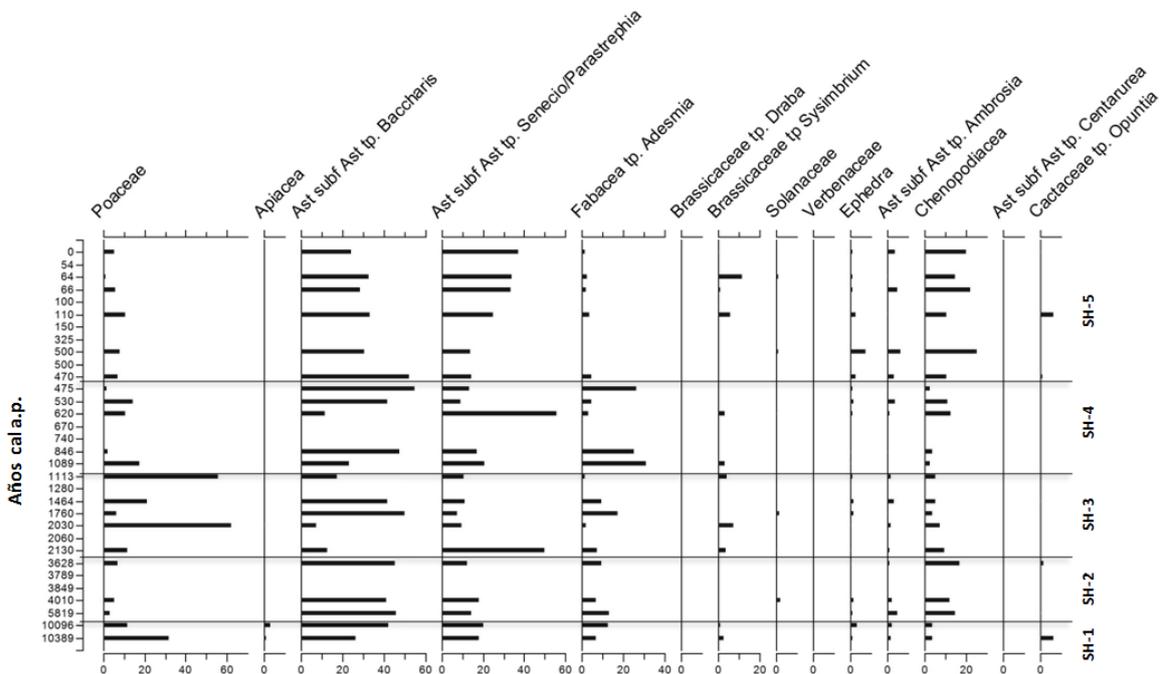


Figura 9 : Diagrama de porcentajes polínicos de paleomadrigueras colectadas en torno a 3750 msnm (Maldonado y González, 2012). Note que: la escala temporal del eje Y se encuentra alterada.

2.8.3 Polen fósil de madrigueras ubicadas a 3500 msnm

En la **Figura 10** se muestran los porcentajes de recuentos polínicos realizados en paleomadrigeras ubicadas en torno a 3500msnm. El diagrama obtenido ha sido dividido en 3 zonas polínicas, las que se describen a continuación desde la más antigua a la más joven.

- Zona SH-1: Corresponde a dos paleomadrigeras fechadas en torno a 3800 años A.P., y muestran el dominio de Chenopodiaceae, acompañado de Fabaceae, Asteraceae tp. *Senecio/Parastrephia* y Asteraceae tp. *Baccharis*.
- Zona SH-2: Corresponde a madrigueras fechadas entre 2000 y 850 años A.P., y muestran el dominio de Asteraceae tp. *Senecio/Parastrephia*, Asteraceae tp. *Baccharis* y Fabaceae, acompañados por Chenopodiaceae en la parte media principalmente.
- Zona SH-3: Corresponde a Madrigueras fechadas en torno a los últimos 850 años A.P., y se caracterizan por el dominio de las Chenopodiaceae, acompañadas de Asteraceae tp. *Senecio/Parastrephia*, Asteraceae tp. *Baccharis* y Fabaceae.

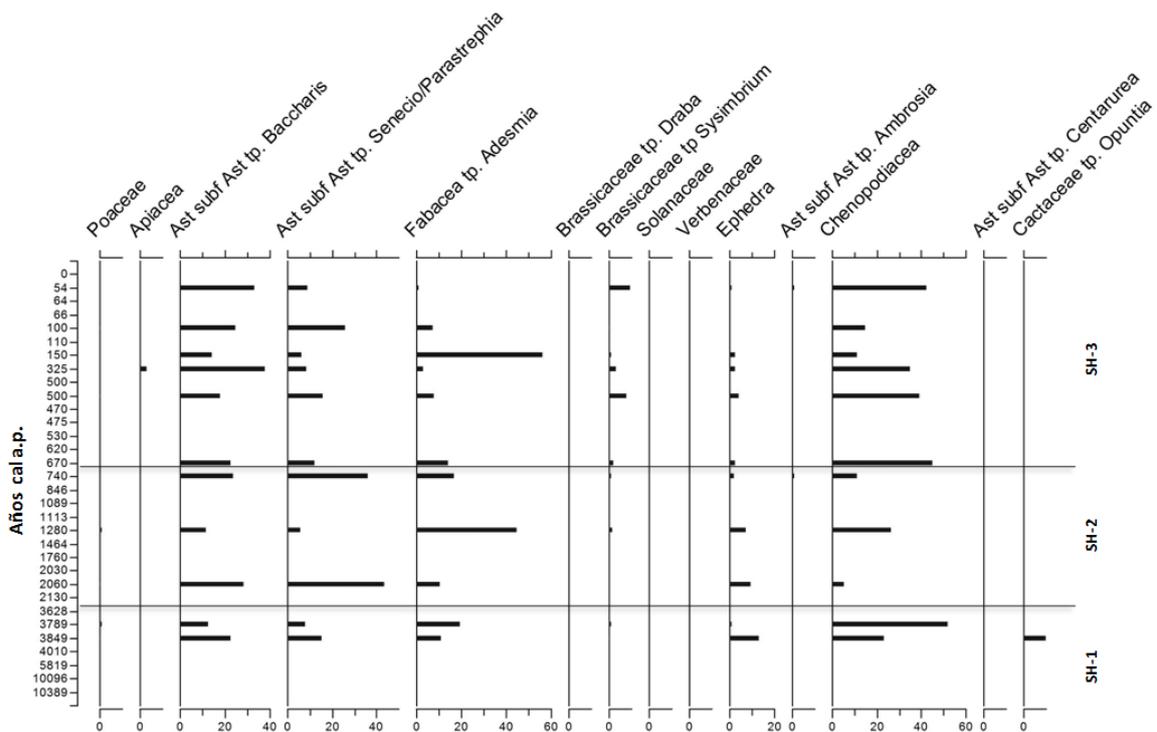


Figura 10 : Diagrama de porcentajes polínicos de paleomadrigeras colectadas en torno a 3500 msnm (Maldonado y González, 2012). Note que: la escala temporal del eje Y se encuentra alterada.

Capítulo 3: Marco teórico.



3.1 Paleoecología y Paleoclimatología

3.1.1 Generalidades

Durante los últimos siglos y sobre todo luego de la Época Industrial la biosfera y el sistema físico climático han presentado cambios fundamentales como respuesta a las actividades humanas (Foley et al., 1998; IPCC, 2007), estas variaciones han despertado el interés en la comprensión de las dinámicas climáticas y los efectos que podrían tener sobre el desarrollo de la vida en la tierra. Esta inquietud se ha traducido en la realización de distintos modelos predictivos que anticipan condiciones climáticas futuras bajo diferentes escenarios posibles basados en condiciones climáticas actuales y aquellas ocurridas durante el pasado (Huang et al., 2008; Huang et al., 2010). La paleoecología se encarga del estudio de las variables bajo las cuales se desarrolló la vida durante el pasado y Lawrence (1971) la definió como “*el estudio de las relaciones que tuvieron lugar, durante el pasado geológico, entre los organismos vivos entonces y su medioambiente*”.

3.1.2 Fuentes de información paleoclimática

En la actualidad los escenarios característicos de tiempos remotos se encuentran determinados por un paisaje totalmente diferente, por lo que la investigación de tales factores se debe realizar de manera indirecta a través de la utilización de registros orgánicos e inorgánicos (de Renzi et al., 1975) que han sido conservados llegando a formar verdaderos “*archivos naturales*” de la historia en la Tierra. La teoría astronómica de los cambios climáticos del pasado se fundamenta en los diferentes montos de insolación recibidos por la tierra a lo largo del tiempo; los efectos de este proceso sobre la vegetación se dieron de manera diferencial en distintas latitudes y longitudes del planeta (Cheddadi et al., 2005). Según (Bradley, 1999) las principales fuentes de información paleoclimáticas son:

- 1) Glaciológicas (testigos de hielo):
 - a) Geoquímica (principalmente iones e isotopos de Hidrogeno y Oxigeno)
 - b) Concentración de gases en burbujas de aire
 - c) Concentraciones de elementos traza y micropartículas
 - d) Propiedades físicas

- 2) Geológicas:
 - A) Marinas (testigos de sedimento oceánico)
 - i) Sedimentos orgánicos (fósiles planctónicos y bentónicos)
 - a) Composición isotópica de Oxígeno
 - b) Abundancia de flora y fauna
 - c) Variaciones morfológicas
 - ii) Sedimentos inorgánicos:
 - a) Tasas de acumulación, y distribución del polvo terrestre y detritos transportados por hielo
 - b) Composición mineralógica
 - B) Terrestres:
 - a) Depósitos y formas de erosión glacial
 - b) Geomorfología periglacial
 - c) Geomorfología costera
 - d) Depósitos eólicos
 - e) Sedimentos, y formas de erosión lacustre
 - f) Rasgos pedológicos (suelos relictos)
 - g) Espeleotemas (edad y composición de isótopos estables)

- 3) Biológicas:
 - a) Dendrocronología (ancho, densidad y composición de isótopos estables en anillos de arboles)
 - b) Polen (tipos, abundancia relativa y/o concentración absoluta)
 - c) Macro restos fósiles de plantas (edad y distribución)
 - d) Insectos (características de la agrupación)
 - e) Corales (geoquímica)
 - f) Diatomeas, ostrácodos y otras entidades biológicas en sedimentos lacustres (ensambles, abundancia y/o geoquímica)
 - g) Actual distribución de poblaciones (refugios y poblaciones de fauna o vegetación relictas)

- 4) Históricas:
 - a) Registros escritos de indicadores ambientales
 - b) Registros fenológicos

Como la interpretación de las condiciones pretéritas requiere de una exhaustiva comprensión del ambiente actual; este fenómeno no puede ser comprendido de manera aislada y ha sido necesario realizar estudios interdisciplinarios provenientes de áreas tan diversas como la ecología, arqueología, geología, biología, geografía, etc. (Islebe, 1999) con el fin de tener una mejor comprensión del entorno; él que es entendido como un sistema físico-climático-biológico que confluye en una delgada capa esferoidal extendida desde las profundidades del océano hasta las zonas más elevadas de la atmósfera y cuyas interacciones dan origen a los sistemas que permiten el desarrollo de la vida en el planeta (Foley et al., 1998).

De la amplia gama de posibilidades existentes, los datos de información paleoclimática frecuentemente provienen de sedimentos de lagos, lagunas y humedales (Booth y Jackson., 2002) ya que la utilización de los registros sedimentológicos permite, entre otras cosas, establecer la composición biológica del entorno de depositación lacustre con gran nivel de detalle durante todo el rango temporal cubierto por los sedimentos (Raper y Zander, 2009) (**Figura 11**). En todo momento, la información debe ser tratada con una visión holística que considere los distintos procesos ocurridos durante la transición de los organismos como parte de la Biosfera hasta la Litosfera (de Renzi et al., 1975).

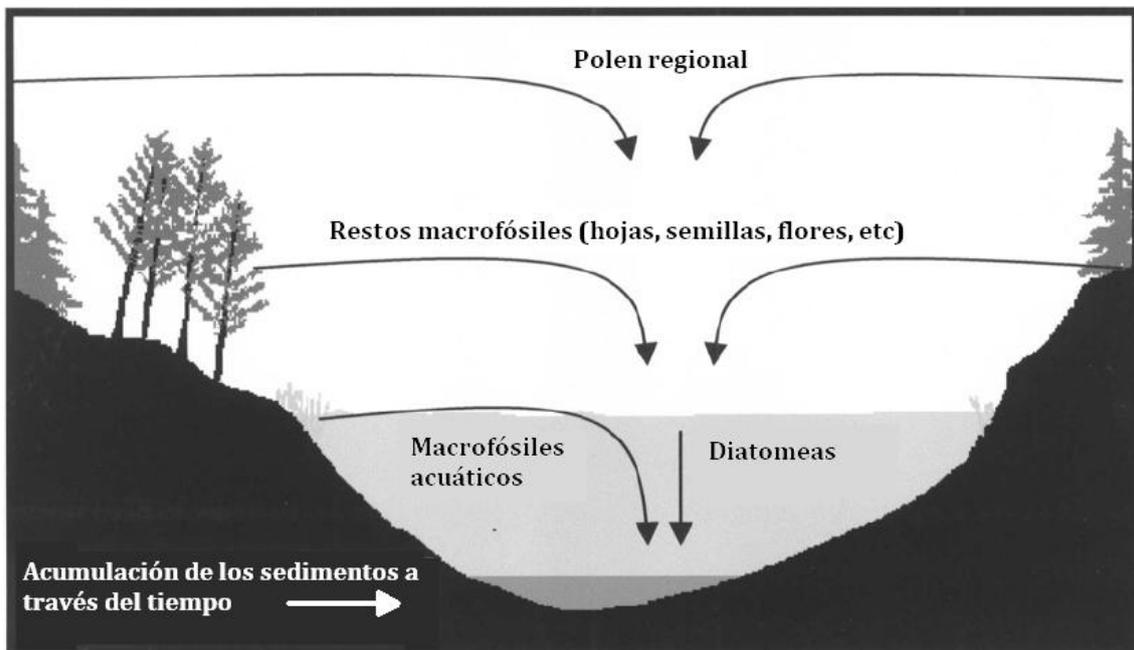


Figura 11: Esquema de depositación sobre sedimentos lacustres y el alcance geográfico exterior que cada uno posee (modificado a partir de Booth y Jackson (2002)).

En un esfuerzo por reproducirse, las plantas liberan cada año millones de toneladas de partículas orgánicas hacia la atmósfera en forma de granos de polen (Angiospermas y Gimnospermas) y esporas (las Criptógamas) (Bradley, 1999); a diferencia de otras estructuras vegetales, los granos de polen y las esporas se encuentran presentes en todas las plantas, de modo que el estudio de ellos permite establecer una relación directa entre la concentración generada y la vegetación responsable de producir tal cantidad (Agashe et al., 2009). La composición orgánica de las plantas hace que éstas se degraden fácilmente bajo ciertas condiciones ambientales dificultando el estudio de la vegetación y su relación con el clima a través del tiempo, sin embargo el polen posee una cobertura denominada *exina* que es extremadamente resistente, compuesta por *esporopolenina* (Faegri y Iversen, 1989), que le ha permitido permanecer prácticamente inalterado en diferentes entornos de depositación (fondos lacustres, pantanos, bofedales, paleomadrigueras, testigos de hielo, etc) durante unos 400 millones de años (Agashe y Caulton, 2009). A continuación se definen los principales conceptos que componen y justifican el estudio de las variables climáticas del pasado a través de registros de polen fósil.

3.1.3 Paleopalinología

El término *palinología* fue acuñado a partir de la definición clásica que los Griegos y Romanos utilizaron para definir a los granos de polen como *aquellas pequeñas partículas de polvo esparcidas en el aire como fuente de alimentación*; la palinología, en su visión más tradicionalista reduce su campo de acción exclusivamente al estudio del polen y las esporas, sin embargo en la actualidad su aplicación se extiende a la descripción estructural de diversas partículas microscópicas entre la que se cuentan diatomeas, foraminíferos y cutículas que proporcionan gran información sobre las condiciones ambientales asociadas al entorno en el cual fueron producidos (Traverse, 2007; Raper y Zander, 2009); la adición del prefijo *paleo* antecediendo al concepto “palinología” hace alusión al estudio del polen producido durante el pasado, con lo que se han podido estimar las variaciones en la composición y ubicación de la vegetación a lo largo de la historia.

La identificación de los granos se realiza a través de la diferenciación morfológica de las principales características del polen mediante microscopía óptica, permitiendo obtener una diferenciación taxonómica agrupada en diferentes tipos polínicos (Islebe,

1999) que generalmente alcanzan el nivel de familia o género y eventualmente, dependiendo de las condiciones locales, el de especie (Bradley, 1999); la concentración de cada tipo polínico presenta variaciones a lo largo del tiempo, reflejando la respuesta de la vegetación en distintos momentos de la historia (Nakagawa et al., 2002).

Las estimaciones paleoclimáticas inferidas a partir de concentraciones polínicas asumen que cada grano: a) posee características morfológicas vinculadas a un género o familia en particular, b) son producidos en grandes cantidades por las plantas y se distribuyen extensamente alrededor de su fuente de origen, c) reflejan la vegetación natural existente durante el momento de la depositación, que (dependiendo de la escala) puede entregar condiciones paleoclimáticas (Bradley, 1999).

La mayor ventaja de la información polínica es que provee un registro cuantificable que puede ser manejado estadísticamente; desafortunadamente las abundancias polínicas no pueden ser asociadas directamente con abundancias en la vegetación ya que los montos de producción, dispersión y preservación de los granos de polen varían entre cada especie (Faegri y Iversen, 1989), constituyéndose en una de las principales desventajas ya que distintas especies o taxa pueden encontrarse sobre o sub-representados en los registros polínicos, por lo que similares abundancias polínicas provenientes de dos taxa distintos pueden estar representando diferentes abundancias en la vegetación (Williams et al., 1998), este problema es mitigado a través de una acabada comprensión de la vegetación y su representación en ensambles polínicos actuales.

3.1.4 Paleomadrigueras

Las zonas áridas y semiáridas de Sudamérica, como el altiplano chileno, cuentan con escasos registros de polen fósil (Markgraf, 1983) que permitan estimar condiciones paleoambientales; esto se debe principalmente a la insuficiencia de sedimentación húmeda continua, la dominancia de especies vegetales polinizadas por insectos y a la gran incertidumbre en los fechados radiocarbónicos, ya que la alcalinidad característica de los sedimentos en estas zonas produce un “*efecto reservorio*” (Geyh et al., 1999; Betancourt et al., 2000; Betancourt y Saavedra, 2002). Sin embargo, durante los últimos años se han establecido registros polínicos extraídos desde madrigueras fósiles de roedores que han sido utilizados para establecer los patrones

de variación climática de manera indirecta a partir del cambio experimentado en la concentración de distintos tipos polínicos a lo largo del tiempo, principalmente durante el Holoceno y Pleistoceno Tardío con muy buenos resultados (Maldonado et al., 2005; Maldonado y González, 2012).

Las paleomadrigueras corresponden a la acumulación de restos vegetales (semillas, granos de polen, flores, hojas y maderas) y animales (fecas de roedores, huesos, plumas e insectos) contenidos en una matriz de orina cristalizada (Betancourt y Saavedra, 2002; Latorre et al., 2005); los restos vegetales incluyen plantas colectadas para la alimentación, protección o construcción de la madriguera. En las zonas áridas del Norte de Chile éstas madrigueras son formadas por al menos cuatro familias de roedores: Abrocomidae (*Abrocoma cinerea*, “Ratón Chinchilla”); Chinchillidae (*Lagidium viscacia* and *Lagidium peruanum*, “Viscachas”); Muridae (*Phyllotis spp.* “Ratón orejón”) y Octodontidae (*Octodontomys gliroides*, “Ratón cola de pincel”) (Figura 12) (Latorre et al., 2005).



Figura 12: Imágenes de roedores a) *Abrocoma cinerea* (Lagos, 2013), b) *Lagidium viscacia* (Vitale, 2013), c) *Lagidium peruanum* (Wilson, 2013), d) *Phyllotis spp* (Saavedra, 2013) y, e) *Octodontomys gliroides* (Sandoval, 2013).

La abundancia polínica al interior de las madrigueras depende, además de la cobertura de vegetación local, de la selección dietaria del animal y la cantidad de polen anemófilo (transportado por el viento), entomófilo (transportado por insectos) y zoófilo (transportado por animales) que se produzca; Lyford et al (2004) demostró que el contenido orgánico de 59 madrigueras modernas de *Neotoma cinerea* (en las montañas Rocallosas, América del Norte) representan adecuadamente las principales

especies arbustivas que poseen más de un 20% de la cobertura vegetal y aquellas con menor cobertura (<20%) se encuentran generalmente ausentes, sin embargo recientemente se ha demostrado que los géneros *Phyllotis*, *Lagidium* y *Abrocoma* presentes en el Norte de Chile, dadas las condiciones ecológicas, no podrían subsistir con una dieta selectiva motivo por el cual son consideradas generalistas y, a causa de esto, se disminuye el sesgo en los registros polínicos obtenidos a partir de sus madrigueras (Cortés et al., 2002; Latorre et al., 2005). Algunos de los procesos involucrados en la depositación del polen al interior de las madrigueras de roedores son: a) el transporte eólico, b) transporte epizoocórico (arrastrados en la piel del animal), c) transporte asociado a las plantas que el roedor ingresa como alimento a la madriguera, y d) transporte endozoocórico (en las fecas de los roedores); este material proviene generalmente de un entorno de ~200mts de radio (**Figura 13**) (Latorre et al., 2005; Maldonado et al., 2005).

Las principales desventajas reconocidas hasta el momento en la utilización de madrigueras fósiles son: a) la incertidumbre en la duración del proceso deposicional, b) proceso de depositación discontinuo en el tiempo, c) dificultad en comparaciones con otros *proxys* y d) la preservación de las madrigueras se encuentra asociada a ambientes rocosos, restringiendo el rango de representatividad espacial solo a estos entornos, sin incorporar ambientes abiertos o de suelos más profundos, generando una sobre-representación de la vegetación de zonas rocosas y una sub-representación del resto de la vegetación (Betancourt y Saavedra, 2002).

Según su tafonomía⁴ es posible distinguir tres tipos de madrigueras: a) las madrigueras fósiles, que resultan fácilmente distinguibles por su estado de cristalización y son llamadas Hyraceum en Sudafrica (Chase et al, 2012) ó Amberat (que significa literalmente ámbar de roedor) en el sur de EE.UU. (Elias, 2007); b) las madrigueras modernas, son aquellas que presentan un grado de cristalización incipiente y cuya datación radiocarbónica puede oscilar entre unos pocos a cientos años de antigüedad y; c) las madrigueras actuales que están constituidas principalmente por depósitos de ramitas sueltas (aun verdes), fecas y algunos restos vegetales colectados por el roedor que a diferencia de las anteriores usualmente no se

⁴Tafonomía: Es el estudio de los procesos de fosilización y comprende la transición de la materia orgánica desde su “muerte” hasta su preservación como restos fósiles.

encuentran consolidados y su período de sedimentación puede contener alrededor de ~50 años de información (Fisher et al, 2009; De Porras et al., 2011) (Figura 14).

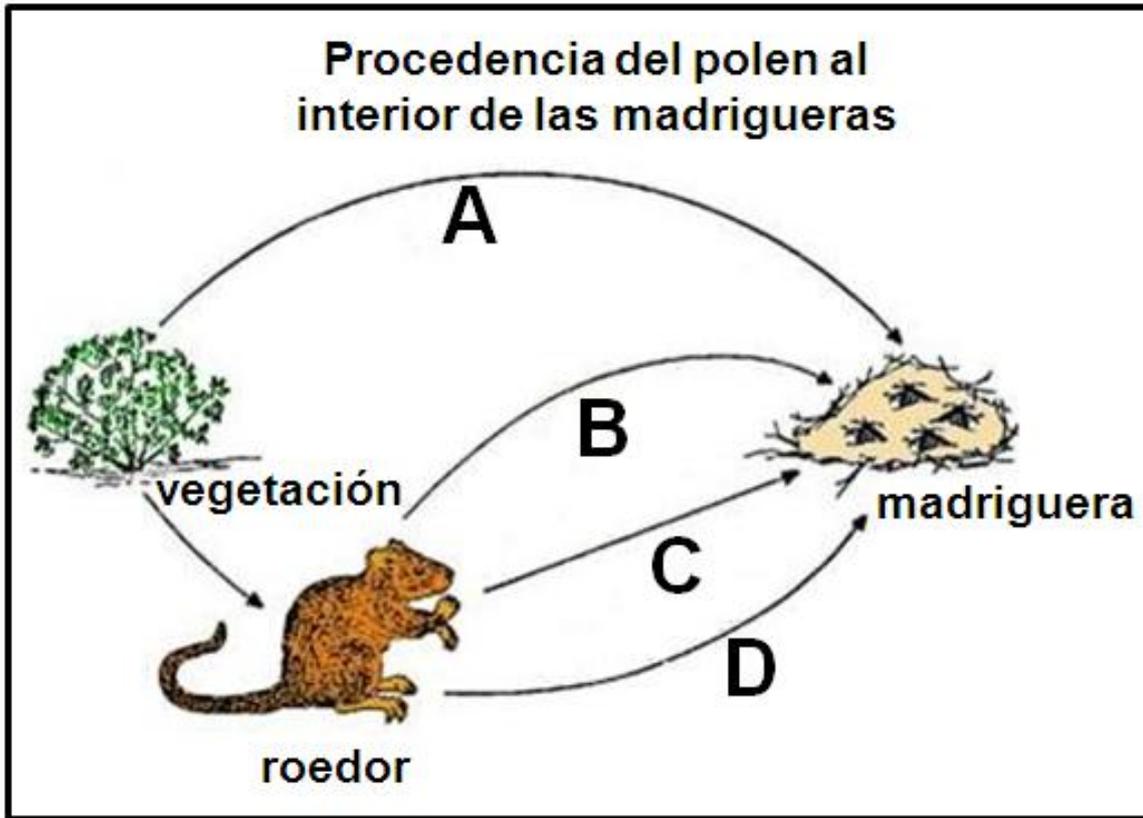


Figura 13: Esquema de procedencia del polen al interior de las madrigueras, a) deposición eólica, b) transportado sobre la piel del roedor, c) transportado sobre la vegetación que el roedor ingresa a la madriguera, y d) al interior de las heces del roedor (Davis et al., 1987).



Figura 14: a) madriguera actual, b) madriguera moderna y, c) madriguera fósil (fuente: Andrés Zamora, 2013).

3.1.5 Dataciones radiocarbónicas:

El carbono-14, radiocarbono ó ^{14}C es un isótopo radioactivo que se encuentra presente en toda la materia orgánica y es incorporado a través del proceso de fotosíntesis a las plantas y mediante la ingesta de éstas a los animales. Luego de la muerte de los organismos el ^{14}C comienza un proceso de decaimiento exponencial, reduciéndose a la mitad luego de 5.730 años, siendo posible establecer la edad de una muestra orgánica fósil a partir de la cantidad que se ha liberado desde la última vez que fue incorporado ^{14}C al organismo. Esta tasa de decaimiento ha presentado variaciones a lo largo de la historia, generando modificaciones en las curvas de concentración isotópica relativa disponible en la atmósfera, siendo necesario realizar procesos de calibración a las fechas resultantes de este método; la mayor de estas variaciones se produjo con la proliferación de actividades nucleares causadas por el hombre a mediados del siglo XX, por lo que se ha convenido en utilizar el año 1950 como el punto de partida para las mediciones y éstas son expresadas en años calendario antes del presente (años cal A.P.) (Bradley, 1999).

Las tasas de variación en la concentración de isótopos de radiocarbono presentan variaciones dependiendo del medio en que han sido depositadas, por ejemplo la alta concentración de carbonatos depositados o lixiviados en el fondo de lagunas exorreicas o la interacción con átomos atmosféricos y de aguas subterráneas genera una alteración en el proceso de reducción molecular; este fenómeno tiene especial implicancia en la datación de registros fósiles provenientes de lagunas altiplánicas y es conocido como “efecto reservorio” (Geyh et al., 1999). Algunos investigadores han propuesto metodologías para corregir este efecto, sin embargo la precisión de las dataciones resultantes aún es motivo de controversia.

3.2 Reconstrucciones climáticas

Por mucho tiempo las reconstrucciones climáticas del pasado inferidas a partir de variaciones en la concentración de polen fósil han sido presentadas como estimaciones fundamentadas en el conocimiento que cada investigador posee sobre el área de estudio y adolecen, eventualmente, de sesgos inherentes a la visión de cada uno de ellos; sin embargo, esto ha ido cambiando paulatinamente con el tiempo y por ejemplo durante el desarrollo de las últimas décadas del siglo XX se observó un gran avance en esta materia gracias a la evolución en la comprensión de los procesos de

deposición y al desarrollo de nuevas tecnologías, de modo que en la actualidad es posible establecer reconstrucciones paleoclimáticas en base a la comparación de variables cuantificables numéricamente, ayudando a incrementar la cantidad y calidad de la información que se puede obtener a partir de un mismo registro polínico (Nakagawa et al., 2002).

Dentro de las reconstrucciones cuantitativas, existen dos aproximaciones principales: las técnicas basadas en modelos de regresión y aquellas basadas en los análogos modernos; las primeras generalmente se asocian a un análisis estadístico multivariado, en donde se establecen ecuaciones que modelan la respuesta que los ensamblajes modernos presentan en relación a una variable ambiental determinada y que son utilizadas para establecer las condiciones climáticas del pasado geológico a partir de registros fósiles. La técnica basada en los análogos modernos asume la existencia de una conducta biológica constante a lo largo del tiempo en respuesta a las condiciones medioambientales; se asume que composiciones orgánicas similares presentan una respuesta climática equivalente, con lo que se pueden reconstruir escenarios bioclimáticos que varían a lo largo del tiempo y a través del espacio (Birks et al., 2010; Jiang et al., 2010).

3.3 Estado general de las estimaciones climáticas.

En la actualidad existen numerosos registros polínicos que cubren todo el Cuaternario Tardío y, en algunos casos, se extienden de manera continua hasta el Plioceno. La precisión de las dataciones, sin embargo, se dificulta por sobre el rango de los fechados radio carbónicos (~50.000 años) y, en estos casos, generalmente se asume que el registro representa un momento cercano al Último Interglacial o aún más antiguo; algunas correlaciones con otro tipo de registros permite realizar estimaciones más precisas, pero siempre con una gran probabilidad de error.

En Europa, existen registros de larga data (>100.000 años) provenientes de lagos y pantanos; el sitio de *Le Grand Pile* en las montañas francesas *French Vosges* con más de veinte testigos para el análisis de polen, macrorestos vegetales, fauna de insectos y el estudio de la sedimentología es uno de los más estudiados y ha permitido establecer con gran precisión las variaciones climáticas del continente ocurridas a lo largo del tiempo.

En África Ecuatorial (Camerún, Congo, Burundi y Ghana) evidencias aportadas por registros polínicos de unos ~27.000 dan cuenta de un gran cambio en la vegetación experimentado entre 19.000-15.000 años A.P., momento en que las bajas temperaturas y disminución de las precipitaciones favoreció el desarrollo de la sabana y predominio de herbáceas en sectores que en la actualidad se encuentran cubiertos por un bosque ecuatorial semidecidual.

Ya que la mayor parte de América del Norte se encontraba cubierta de hielo durante el último período glacial, solo algunos lagos profundos como el Tulane al Centro-Sur de Florida poseen buenos registros polínicos (unos ~50.000 años A.P.) que han permitido establecer diferentes momentos climáticos caracterizados por el predominio de pino bajo condiciones similares a las actuales y una sabana de robles e incluso una vegetación abierta dominada por pastizales cuando las temperaturas fueron muy bajas.

En Sudamérica el registro polínico más antiguo, obtenido en las cercanías de la localidad de Funza en plena Sabana Colombiana, posee una resolución temporal de unos ~1.500.000 años A.P. (Mioceno Tardío) que entrega una extensa panorámica de la variación altitudinal de la vegetación sobre los Andes colombianos.

Registros polínicos de larga data (~40.000 años A.P.) en la cuenca Amazónica de Brasil han permitido establecer que durante el Último Máximo Glacial las condiciones fueron húmedas y frías, con temperaturas inferiores a 6-9°C y en algunas zonas periféricas se cuenta con evidencia del avance de la sabana hacia el interior en momentos más secos, sin embargo aún no existen pruebas suficientes que sustenten la idea del predominio de la sabana sobre gran parte de la cuenca Amazónica durante períodos de influencia glacial (Bradley, 1999).

En Chile destaca el registro palinológico de Tagua-Tagua, uno de los pocos que posee más de 50.000 años A.P. de manera continua; el predominio de polen de *Nothofagus tp. dombeyi* y *N. tp. oblicua* entre 50.000 y 38.000 años y 28.000 y 11.500 años cal A.P. como evidencia de una gran variación de la vegetación en relación a la actual sugiere momentos mucho más fríos y húmedos (Latorre, 2006).

Capítulo 4: Marco metodológico



4.1 Pasos metodológicos

De manera esquemática, general, el proceso de investigación se divide en cuatro grandes partes (Figura 16) la **primera etapa o de recopilación en gabinete** (abril a septiembre de 2012) consistió en la reunión de material bibliográfico para establecer el marco teórico conceptual, los lineamientos metodológicos, la caracterización del área de estudio y la selección de las variables climáticas a utilizar; además de la incorporación y sistematización de datos obtenidos en trabajos de terreno y procesamientos previos (conteos polínicos de 9 madrigueras actuales y 32 madrigueras fósiles –fechadas con ^{14}C -).

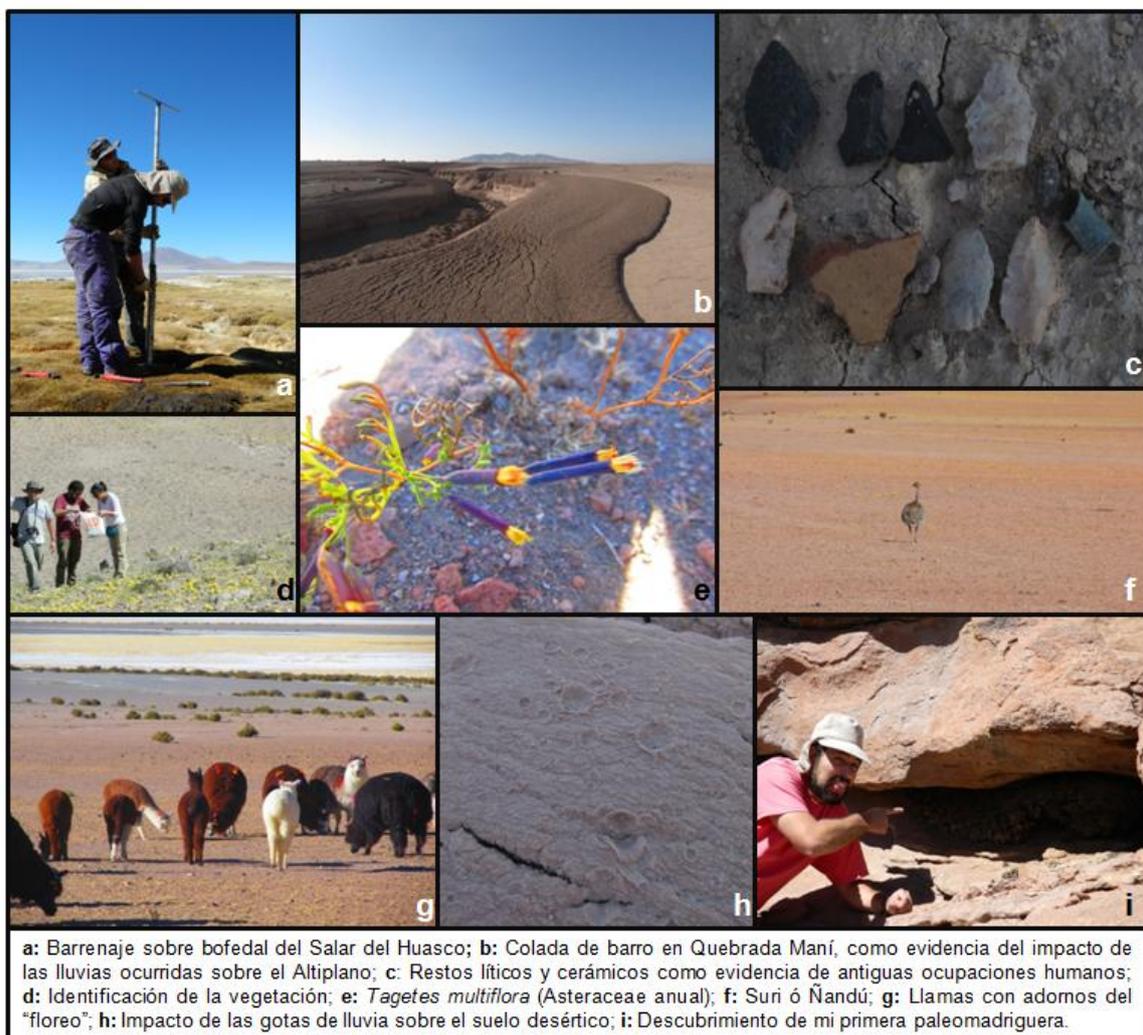


Figura 15: Ilustración de algunas actividades y/o hallazgos realizados en actividades de campo.

La **segunda fase** correspondiente al **trabajo de campo (Figura 15)** se llevó a cabo entre el 29 de Mayo y el 8 de Junio de 2012. Durante esta etapa se realizó un reconocimiento⁵ general de todos los sectores cercanos al área (transecto) de estudio, se colectaron dos muestras de madriguera actual hacia el Sur del salar y se entablaron conversaciones informales con pobladores que residen permanentemente en las cercanías del salar. Adicionalmente se efectuaron labores de barrenaje en la vega del Salar del Huasco (testigos de turba) y se colectaron dos madrigueras actuales sobre los 4.000msnm y 12 madrigueras fósiles en torno a 4.000msnm (piso altoandino), que serán analizadas en trabajos posteriores.

Durante la **tercera etapa o de proceso y análisis en gabinete** (septiembre 2012 a enero de 2013), con el trabajo de laboratorio, los diagramas de concentración polínica de nueve madrigueras actuales se incrementaron en dos unidades gracias a la incorporación de las muestras colectadas en la segunda fase o *trabajo de campo*; posteriormente se estableció la relación actual existente entre el clima y los principales tipos polínicos; se efectuó una función de transferencia para estimar el clima del pasado a partir de la concentración de polen en 32 madrigueras fósiles, seleccionando el modelo de estimación climática más adecuado y comparando los resultados con estimaciones paleoclimáticas previas que permitieran obtener una reconstrucción climática cuantitativa consistente y coherente.

La **etapa final** del proceso de investigación se centró en la **elaboración del informe final** (diciembre 2012 a abril de 2013), durante este período se volvieron a revisar algunos pasos de las etapas anteriores con el fin de corregir posibles errores y verificar los resultados.

⁵El “reconocimiento general” del área de estudio entregó escasos elementos “tangibles” utilizados en la generación de los resultados finales de la investigación, sin embargo se reconoce como un momento clave en la comprensión del funcionamiento natural y cultural local. Destacan la constatación in-situ de: la variación altitudinal de los pisos de vegetación, la oscilación térmica diaria, la gran influencia del agua sobre el desarrollo de la vida en el altiplano y en sectores más bajos, y la observación de sitios arqueológicos como evidencia de un incremento de la precipitación durante el pasado.

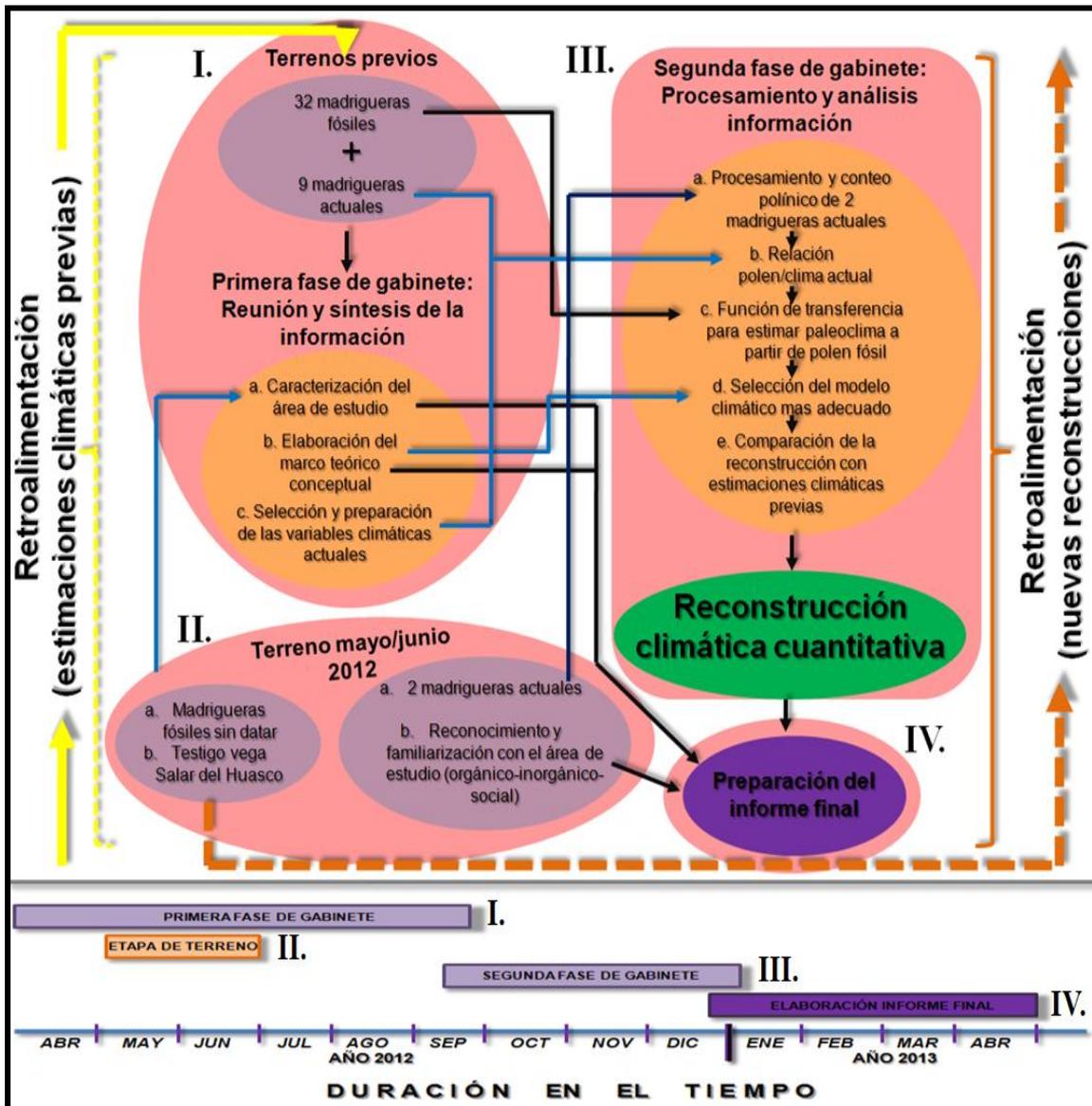


Figura 16: Esquema metodológico general del proceso de investigación.

4.2 Metodología general

Según Birks et al (2010) las reconstrucciones cuantitativas que pretenden explicar las variables climáticas y/o ambientales se basan en el principio de *Uniformismo* y *Actualismo*, en donde se asume que la relación existente entre los organismos y su medioambiente próximo se ha mantenido constante a través del tiempo, al menos durante el Cuaternario Tardío; este mecanismo recibe el nombre de *Conservación del Nicho* y es definido “como la tendencia de las especies a retener las características ecológicas ancestrales” (Wiens et al., 2005).

La idea fundamental de toda reconstrucción cuantitativa en base a registros orgánicos radica en la utilización de datos fósiles (p.e: registros polínicos), también conocidos como *proxys*, de un rango temporal dado (Y_f) para inferir condiciones paleo-ambientales (X_f) (p.e: precipitación anual o temperatura media anual) del espectro temporal representado en los ensambles fósiles de estudio. Cualquiera sea el método empleado para inferir el clima del pasado (X_f), es necesario conocer la distribución y/o abundancia actual (Y_m) de todos los taxa presentes en los registros fósiles y su relación con el clima actual (X_m). La relación existente entre ocurrencia y/o abundancia de Y_m y las variables climáticas actuales X_m permitiría reconstruir X_f a partir de ensambles fósiles Y_f (Figura 17) (Birks et al., 2010).

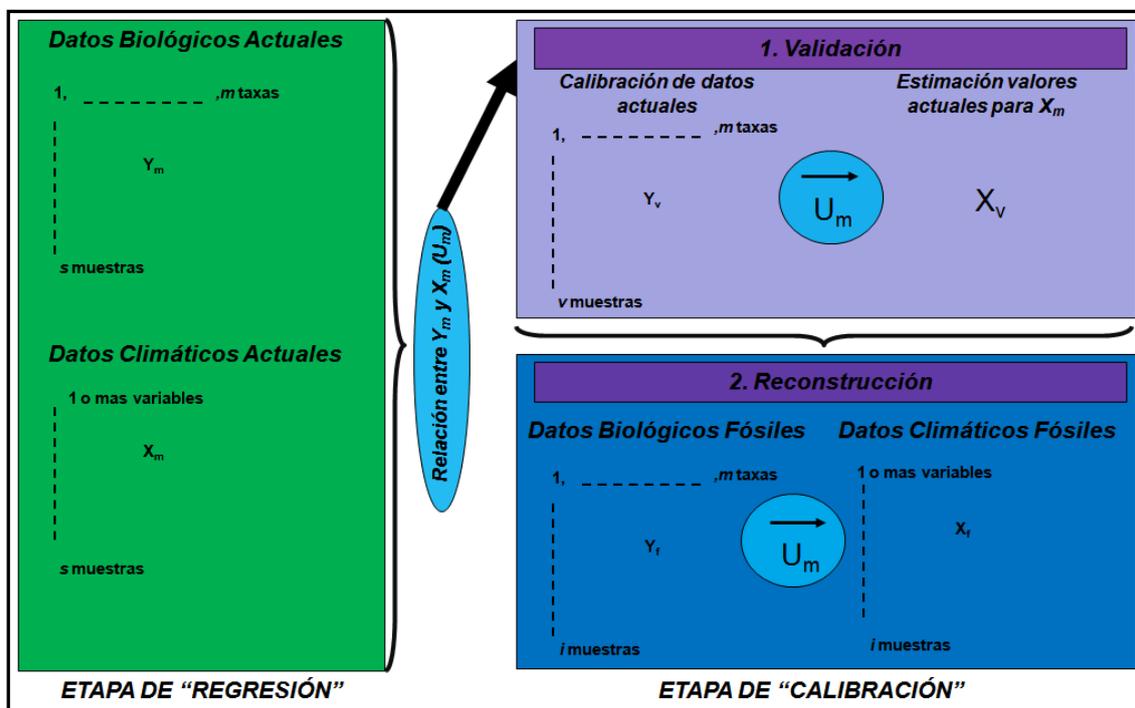


Figura 17: Principales etapas en la reconstrucción paleoclimática cuantitativa para crear la función de calibración U_m en base a X_m e Y_m , que permite estimar el clima del pasado X_f en base a datos biológicos fósiles. Además se muestra la validación cruzada de los datos actuales (Y_v e X_v). Fuente: elaboración propia a partir de Birks (2010).

4.2.1 Requerimientos básicos y Principales supuestos para la realización de reconstrucciones cuantitativas.

Existe una serie de elementos previos que deben ser considerados al momento de llevar a cabo una reconstrucción climática cuantitativa; estos son el resultado de una serie de consideraciones numéricas y propiedades ecológicas de la información biótica

moderna y su relación con el clima. A continuación se presentan siete requerimientos y seis supuestos básicos que se deben tener en cuenta según Birks et al. (2010).

4.2.1.1 Requerimientos

1. Contar con la identificación de un sistema biológico capaz de producir suficiente información fósil que haya sido sensible a las variaciones climáticas de interés en la actualidad, sobre una escala temporal y espacial determinadas.
2. Disponer de un gran set de datos (orgánicos) actuales (Y_m) de calidad y establecer la forma en que se relacionan con el clima (X_m). Esta información debe representar un rango similar al de las condiciones climáticas pasadas, ser consistente y detallado en su nomenclatura y taxonomía, ser de una calidad similar (procesos de recolección de información, escala espacial, tamaño de la muestra, metodología de muestreo, procedimientos de preparación, técnicas de conteo) y, provenir de un entorno sedimentario similar al de las muestras fósiles.
3. Los set de datos fósiles (Y_f) utilizados para la reconstrucción deben poseer una taxonomía, nomenclatura, calidad, entorno de sedimentación y, una tafonomía similares y comparables con Y_m .
4. Se requiere un buen control cronológico que sea independiente al set de datos fósil con el fin de correlacionar, comparar y permitir -en caso de ser necesario- la cuantificación en las tasas de respuesta biológica en relación con el cambio climático.
5. Utilizar un modelo matemático robusto durante los procesos de regresión y calibración con la finalidad de modelar las complejas relaciones, no lineales y usualmente unimodales que existen entre los taxa modernos y el clima. Los modelos matemáticos empleados deben ser teórica, estadística y ecológicamente hablando fáciles de comprender y además deben funcionar correctamente con un amplio o reducido set de datos, también deben ser adecuados cuando se posea una amplia riqueza taxonómica en los ensambles.
6. Se requiere una estimación del error estándar de la predicción de manera segura y realista para el conjunto de datos modernos X_m e Y_m y para las variables climáticas reconstruidas (X_f). Ya que la confiabilidad de los valores climáticos reconstruidos puede variar de una muestra fósil a otra (p.e. a causa de la conservación o preservación de la muestra); estimar el error estándar resulta primordial.

7. Es necesario realizar una evaluación crítica en términos ecológicos, numéricos y paleoclimáticos de todas las reconstrucciones (X_f); como en el caso de todas las regresiones numéricas y en los procesos de calibración desarrollados para producir resultados. Además, resulta imprescindible evaluar si las regresiones resultan ser ecológicamente significativas, numérica y paleoclimatológicamente confiables, para finalmente compararlas con otros registros independientes.

4.2.1.2 Supuestos

1. Los taxa m presentes en el set de calibración (Y_m) se encuentran sistemáticamente relacionados con el clima (X_m) en el que se desarrollan.
2. La o las variables climáticas (X_f) que serán reconstruidas se encuentran linealmente relacionadas con algún factor de importancia ecológica al interior del sistema de interés y esta relación se encuentra a una escala cuantitativa continua.
3. Los taxa m presentes en el set de calibración (Y_m) deben ser las mismas entidades biológicas en el registro fósil (Y_f) y se asume que la respuesta ecológica de X_m y X_f no ha presentado modificaciones durante la escala temporal cubierta por los ensamblajes fósiles, por lo que el rango de distribución actual de los taxa (Y_m) en relación a X_m puede ser utilizado para reconstruir variaciones experimentadas en X_f a través del tiempo, a partir de Y_f (Substitución "Espacio-por-Tiempo").
4. Los modelos matemáticos utilizados representan adecuadamente la respuesta de las especies (Y_m) en relación a distintas variables climáticas (X_m), produciendo funciones de calibración (U_m) con un poder predictivo capaz de reconstruir X_f de manera exacta e imparcial.
5. Aquellas variables medioambientales, a excepción de la de interés (X_f), no poseen gran influencia sobre Y_f durante el rango temporal de estudio, esto significa que la distribución del conjunto de variables de éstas fue la misma durante el pasado que en la actualidad, o al menos no produjeron cambios medioambientales presentes en la actualidad.
6. En la validación del modelo y en la estimación del error de predicción mediante alguna forma de validación cruzada, los datos de análisis son independientes del set de calibración.

4.2.2 Promedio Ponderado, PP (Weighted Averaging, WA)

La cláusula fundamental de este método asume que las especies ocupan diferentes nichos a través del espacio medioambiental, nichos que pueden ser caracterizados mediante parámetros que describen el centro del nicho y la amplitud de éste, los que corresponderían a la distribución óptima (**u**) y al rango de tolerancia (**t**) de cada especie (Ter Braak et al., 1993; Juggins et al., 2012); además supone que: *si el desarrollo de un taxón es directamente proporcional con alguna variable climática, su abundancia tenderá al incremento en aquellos sectores que presenten el óptimo climático o nicho óptimo de cada una de ellas; por el contrario su abundancia tenderá a la disminución cuando las condiciones climáticas sean desfavorables*. Una manera simple y ecológicamente realista de estimar el óptimo climático de cada taxa se logra promediando los valores climáticos de todos los sitios donde un taxón se encuentre presente, ponderado por la abundancia relativa de cada uno de ellos (Regresión PP). La variable climática estimada de cada sitio corresponderá al porcentaje ponderado de los óptimos de todas las taxa presentes en cada uno de ellos (Calibración PP). (Ter Braak et al., 1993; Birks et al., 2010).

$$u_m = \frac{\sum_{s=1}^n y_{sm} x_s}{\sum_{s=1}^n y_{sm}} \quad \text{REGRESIÓN PP}$$

Donde: **U_m** es el óptimo del taxón **m**; **y_{sm}** es la abundancia del taxón **m** en la muestra **s**; **x_s** es la variable medioambiental en la muestra **s** y **n** corresponde al número de sitios.

De esta misma forma, la muestra fósil estará dominada por aquellos taxa cuyo óptimo sea similar a las condiciones medioambientales dominantes durante el momento en que ésta fue depositada. De modo que la reconstrucción del paleoclima **X_f** será el resultado obtenido a partir del promedio ponderado de los óptimos climáticos de cada especie en cada una de las muestras, proceso conocido como calibración:

$$x_f = \frac{\sum_{m=1}^m y_{sm} u_m}{\sum_{m=1}^m y_{sm}} \quad \text{CALIBRACIÓN PP}$$

Donde: m es el número de taxa; X_f representa la variable climática que busca ser reconstruida.

Las ecuaciones anteriores ilustran el proceso de Promedio Ponderado como resultado de un análisis multivariado de especies indicadoras, metodología de aproximación a la reconstrucción ambiental, en donde cada especie posee el mismo valor indicativo. Algunas conclusiones sugieren, sin embargo, que algunas especies resultan ser mejores indicadores que otras, por ejemplo aquellas con un reducido rango de tolerancia debieran ser más confiables que aquellas con un amplio rango de distribución en un gradiente medioambiental, por lo que la ecuación anterior podría modificarse por la ponderación de los taxa multiplicado por el inverso de su tolerancia al cuadrado, generando una reducción en la ponderación de los taxa con amplia tolerancia (valores poco indicativos).

$$X_f = \frac{\sum_{m=1}^m \frac{y_{sm} u_m}{t_m^2}}{\sum_{m=1}^m \frac{y_{sm}}{t_m^2}}$$

Un sencillo promedio ponderado de la tolerancia estimada t para un taxón m (=desviación estándar ponderada) está dado por:

$$t_m = \left[\frac{\sum_{s=1}^n y_{sm} (x_m - u_m)^2}{\sum_{s=1}^n y_{sm}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

En las reconstrucciones medioambientales realizadas por PP los promedios se realizan dos veces, una vez durante la regresión y una segunda oportunidad durante el proceso de calibración. Esto se traduce en una contracción en el rango de los valores inferidos hacia la media de X_m . Para corregir este problema, se realiza una “descontricción” lineal que puede seguir una de las dos propuestas siguientes:

1) Regresión inversa en donde los valores observados X_m son “regresionados” sobre los valores inferidos X_v inicialmente para el set de calibración moderna utilizando la regresión lineal:

$$\text{inicial } x_v = b_0 + b_1 x_m$$

ó

$$\text{final } x_v = (\text{inicial } x_v - b_0) / b_1$$

Donde: b_0 es el intercepto y b_1 la pendiente de la regresión lineal. Ó a través de una regresión inversa, donde los valores inferidos X_v son “regresionados” sobre los valores observados X_m :

$$x_m = b_0 + b_1 \text{ inicial } x_v$$

ó

$$\text{final } x_v = b_0 + b_1 \text{ inicial } x_v$$

Debilidades:

1. El PP es sensible a la ubicación de las muestras del set de entrenamiento distribuidas a lo largo del gradiente climático de interés. Lo que se soluciona con una amplia serie de datos, ya que con más de 400 muestras el método ha mostrado suplir este problema.
2. PP ignora la correlación residual en los análogos modernos, de modo que esta omisión se mantiene en los datos biológicos una vez que estos son asociados con las variables climáticas. Esta correlación residual es el resultado de variables ambientales que no fueron consideradas directamente en el PP.
3. PP posee “efecto de borde” que provoca una distorsión no lineal en un gradiente longitudinal. Este problema es particularmente grave para conjuntos de entrenamiento que poseen una marcada dominancia singular y gran variación taxonómica, provocando una sobreestimación del límite inferior y una subestimación del límite superior del rango óptimo, lo que a su vez produce sesgos en los valores inferidos.

4.2.3 Selección del modelo

El método de Promedio Ponderado entrega una serie de modelos que explicarían la respuesta de los registros biológicos a las diferentes variables climáticas, por lo que resulta de vital importancia contar con criterios adecuados que permitan elegir cual de todas las opciones se ajusta de mejor forma a la realidad. La elección de la opción que mejor explique el modelo se llevará a cabo mediante la consideración del menor valor

de predicción (RMSEP), la mayor relación cuadrática entre la predicción-bootstrap y los valores observados (r^2) y menor Sesgo Máximo (Ter Braak et al., 1993; Shennan et al., 2003; Wilmshurst et al., 2003; Horton et al., 2007; Herzschuh et al., 2009; Salonen et al., 2011; Luoto, 2012). A continuación se detalla la manera de obtener cada uno de los indicadores expuestos.

Los modelos, al ser sistemas de representación de la realidad, necesitan contar con indicadores que revelen numéricamente la relación existente entre los objetos modelados y los observados; deben ser estadísticamente significativos, acertados, precisos y confiables en una dimensión ecológica y paleoecológica. La precisión y calidad del modelo es medido a través del error de predicción, sin embargo como el valor del pasado usualmente es desconocido no se puede calcular el error de predicción verdadero para una muestra fósil; en cambio se estima el error de predicción para el set de entrenamiento y, posteriormente, se asume que éste refleja el verdadero error de predicción. El error de predicción es calculado mediante la raíz cuadrada del error de predicción (RMSE), definido como la raíz cuadrada de la diferencia cuadrática media entre los valores ambientales observados e inferidos. Analizando la sigla por separado, desde la última letra, se obtiene que la E corresponde al error dado por el residual, es decir el valor esperado menos el predicho, S indica el valor cuadrático del residual, M es la media de los errores cuadráticos, finalmente R indica la aplicación de la raíz cuadrada de estos procesos.

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_m - x_v)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

El RMSE resulta ser un adecuado resumen de la capacidad predictiva del modelo y posee la ventaja de estar expresado en las mismas unidades que los valores ambientales trabajados. El coeficiente de determinación (r^2) entre X_m y X_f también es frecuentemente calculado, lo que resulta de utilidad al comparar diferentes variables ambientales, pero como depende de la magnitud del error del modelo y la variación entre X_m y X_f , debe ser interpretado cuidadosamente ya que modelos con un mismo error de predicción podrían tener valores de r muy diferentes dependiendo de la amplitud que abarca el gradiente medioambiental del set de entrenamiento (Juggins y Birks, 2012).

En general, cuando se considera solamente el set de entrenamiento el RMSE es sub-estimado, al mismo tiempo r y r^2 resultan ser sobre-estimados por lo que es necesario realizar algún tipo de división muestral o validación cruzada con el fin de estimar el error de predicción de manera confiable y realista. Idealmente la validación cruzada debiera incorporar un set de prueba independiente (validación cruzada externa), sin embargo es extraño disponer de muestras “adicionales”, pues éstas son de mayor utilidad en el set de entrenamiento, por lo que se lleva a cabo una “validación cruzada interna” que simula los errores probables cuando se aplica al modelo en datos nuevos. Existen, básicamente, tres tipos de validación cruzada interna conocidos como método de “exclusión n-veces” (*n-fold leave-one-out*), exclusión (*leave-one-out*) y muestreo aleatorio (*bootstrapping*).

En *leave-one-out*, las muestras son ordenadas aleatoriamente y, consecutivamente, una proporción de ellas (p.e. 20%) es excluida del set de entrenamiento, la función de calibración obtenida de las muestras restantes es aplicada a la muestra excluida, que actúa como “set de prueba”, posteriormente los errores cuadráticos de las muestras son agrupados para formar el RMSE de la predicción (RMSEP); el proceso se repite n-veces, donde n corresponde a la cantidad de muestras. Es necesario destacar que el RMSE es un error aparente y por lo tanto diferente del RMSEP.

N-fold leave-one-out es un caso particular de *leave-one-out*, en donde cada muestra es excluida consecutivamente para formar solo una muestra como set de prueba. Amplios set de entrenamiento usualmente incorporan réplicas inherentes, de modo que el RMSEP de *leave-one-out* se vuelve menos confiable con sets de entrenamientos más numerosos. *N-fold leave-one-out* resulta ser un test de mayor rigurosidad, pero puede resultar demasiado pesimista ya que el set de entrenamiento se vuelve cada vez menor en cada paso.

La validación cruzada *bootstrap* ayuda a corregir esta deficiencia seleccionando muestras del set de entrenamiento original (de un tamaño dado-n-), las que son reemplazadas para formar un nuevo set de entrenamiento de *bootstrap*, también de un tamaño dado (n). Ya que las muestras son seleccionadas con reemplazo, algunas resultan ser incluidas más de un vez y en promedio un tercio no son seleccionadas, formando el set de datos de *bootstrap*. Este procedimiento es llevado a cabo gran

número de veces (generalmente 10.000) y los errores cuadráticos de los set de prueba a lo largo de todos los ciclos de *bootstrap* son incluidos en el RMSEP.

En la práctica, la totalidad del Sesgo Medio calculado para el set de entrenamiento posee valores cercanos a cero, sin embargo los modelos suelen mostrar una tendencia a sobre o sub-estimar alguna sección del gradiente. Esta forma de error sistemático es cuantificada a través del Sesgo Máximo, que es calculado dividiendo el gradiente en segmentos proporcionales (generalmente 10) y luego calculando el Sesgo Medio para cada uno de ellos. De modo que el Sesgo Máximo corresponde al mayor valor absoluto de los Sesgos Medios para cada segmento (Juggins y Birks, 2012).

La división muestral involucra una segmentación aleatoria de los datos actuales al interior del set de entrenamiento y el set de prueba, además de la utilización del set de entrenamiento para predecir las variables climáticas actuales para todos los set de prueba. La comparación entre las variables observadas y predichas para las muestras en el set de prueba incorpora una evaluación realista del RMSEP, r y r^2 . Según Ter Braak y Van Dam (1989) RMSEP resulta ser un “*apropiado punto de referencia para comparar distintos métodos*” debido a que todos los errores son considerados.

Resulta de suma importancia diferenciar entre RMSE, r , r^2 y $RMSEP_{(bootstrap)}$, $r_{(bootstrap)}$, $r^2_{(bootstrap)}$ ya que los primeros son calculados cuando la muestra n es considerada en el set de entrenamiento, los segundos en cambio son resultado de la comparación entre los valores observados y estimados cuando la muestra n ha sido excluida del ensayo de entrenamiento (Birks, 1995).

4.3 Materiales

4.3.1 Reconstrucción cuantitativa con polen proveniente de madrigueras de roedores

Para dar cumplimiento al objetivo general de “reconstruir cuantitativamente las condiciones paleoclimáticas”, el diseño general de la investigación se rige por un modelo deductivo (Hernández-Sampieri et al., 2006) que establece con gran precisión un set de calibración con la relación que existe entre cada tipo polínico (obtenido a partir de madrigueras actuales de roedores) y el clima actual; y posteriormente, a través de una función de transferencia aplicada a un set de polen fósil (proveniente de madrigueras fósiles de roedores) es posible conocer las variables medioambientales en distintos momentos del pasado (**Figura 18**).

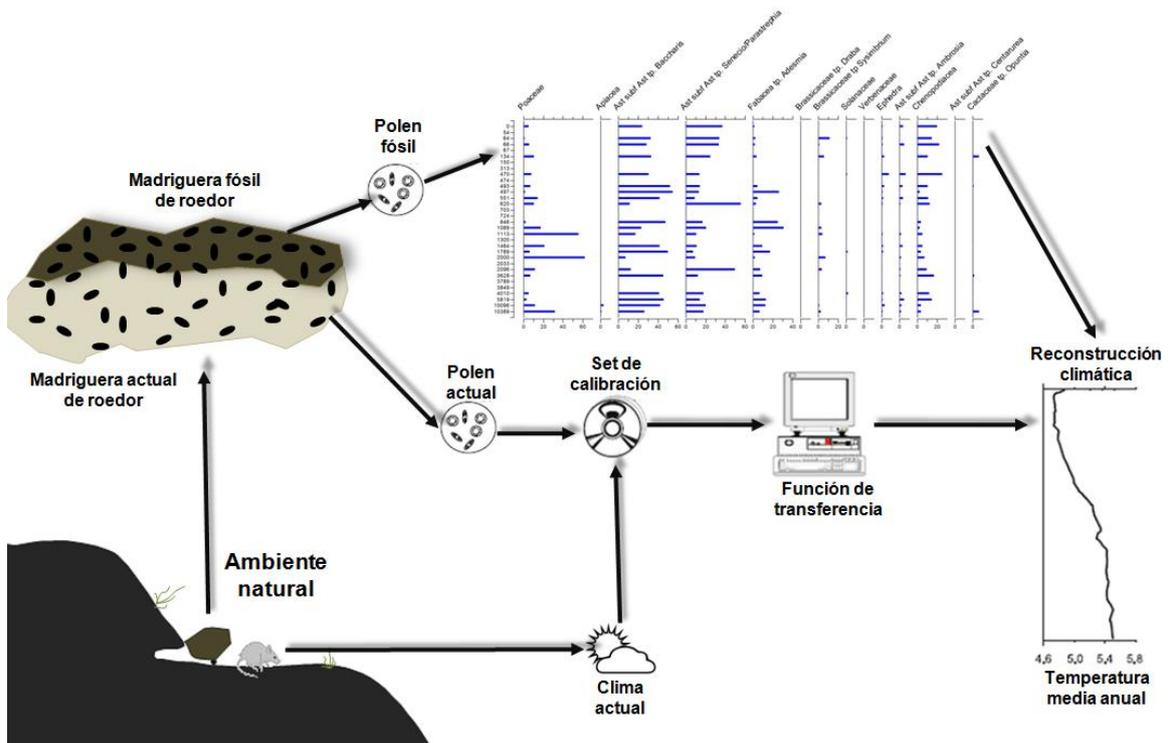


Figura 18: Esquema general del proceso de reconstrucción cuantitativa a partir de polen de madriguera de roedores. Fuente: elaboración propia a partir de Juggins y Birks (2012).

4.3.2 Polen de madrigueras actuales

La base de datos de polen actual corresponde al registro obtenido a partir de once madrigueras actuales de roedores no consolidadas (**Tabla 2a**) distribuidas en un gradiente climático-altitudinal ubicado entre Pozo Almonte y Salar del Huasco (**Figura 2c**); las nueve madrigueras ubicadas en la sección occidental del perfil fueron colectadas, procesadas y analizadas durante el año 2010 por el Laboratorio de Paleoecología del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) (De Porras et al., 2011); las dos madrigueras restantes se colectaron durante el año 2012 por integrantes del mismo laboratorio en el sector Sur Este del salar del Huasco, a 3.954 y 4.050 msnm (**Figura 2b,c**); su procesamiento y posterior análisis fueron realizados durante el proceso de esta Memoria. Los 33 tipos polínicos registrados en las madrigueras representan la vegetación local en un radio máximo de 200 metros.

Según lo consignado en la metodología de función de transferencia original, el set de calibración actual alcanza un peso estadístico suficiente con al menos 400 muestras; sin embargo, según Tonello (comunicación personal, Junio 2013) la representación del gradiente climático resulta de mayor importancia ya que lo que estamos evaluando verdaderamente es un sistema natural que es posteriormente representado, en este caso por un modelo matemático.

La extracción del polen de las muestras de madrigueras actuales se realizó mediante la aplicación de las metodologías descritas por Faegri & Iversen (1989):

-se procesó 1 cc de sedimento de cada muestra, excluyendo las fecas para disminuir la sobre-representación de la vegetación micro-local inducida por la influencia directa de la dieta del roedor y obtener un panorama real de la vegetación a nivel local (Davis y Anderson, 1987).

-Previo al tratamiento físico-químico se agregaron a cada muestra dos pastillas con un marcador extra local (esporas de *Lycopodium*) (Stockmarr, 1971) para calcular la concentración polínica (granos de polen/cm³ de sedimento).

-El tratamiento consistió en:

- Defloculación de arcillas y eliminación de ácidos húmicos con KOH al 10%.
- Remoción de los carbonatos con HCl al 10%.
- Remoción de silicatos con HF y acetólisis.

-Del material obtenido se tomó una cantidad de volumen para ser observada al microscopio (con una magnificación de 1000 y 400X), haciendo un recuento no inferior a 300 granos por cada muestra.

-Los granos de polen se determinaron mediante microscopía óptica utilizando como apoyo muestras de referencia disponibles en el laboratorio y descripciones bibliográficas (Heusser, 1971; Markgraf et al., 1978).

-La determinación se realizó a nivel de género o familia, según el grado de resolución al que se pudo acceder (**Figura 32**).

4.3.3 Clima actual

La caracterización climática incluyó la precipitación y temperatura, ya que estos han sido considerados como los principales factores climáticos que condicionan el desarrollo de la vegetación en sectores Altiplánicos (Arroyo et al., 1998; Latorre, 2002). Los datos fueron extraídos desde archivos raster generados por Hijsmans et al (2005). Estos cuentan con una resolución espacial de 30 segundos de arco correspondientes a 0.86 km² en el ecuador (usualmente asociado a 1 km²).

Esta información surge en base a mediciones de estaciones climáticas distribuidas en el mundo que están o estuvieron activas al menos por diez años durante el período 1950-2000; se encuentra disponibles en bases de datos pertenecientes a organismos mundiales que recopilan información sobre estaciones meteorológicas de varios países, las principales organizaciones son: *Global Historical Climate Network Dataset* (GHCN), *World Meteorological Organization* (WMO) y *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO).

Además para el caso de Latinoamérica la información utilizada se complementó con datos de R-HydroNET (<http://www.r-hydronet.sr.unh.edu/english/>) e INTECSA (para el Altiplano Peruano-Boliviano). En términos generales el GHCN posee la mejor calidad en la localización de los datos, de modo que la información adicional solo fue incorporada en caso que las estaciones estuvieran ubicadas a más de 5km de algún punto de control conocido, con la finalidad de evitar dualidad de datos. Los resultados finales fueron obtenidos mediante la interpolación de los valores entregados para cada una de estas estaciones, pudiendo establecer una cobertura climatológica a nivel

global que contiene información de precipitación mensual, además de temperatura mínima, promedio y máxima mensual.

La principal falencia de los datos climáticos empleados se encuentra en la distribución espacial de las estaciones utilizadas para la interpolación, ya que éstas poseen una escasa representación del área de estudio (**Figura 19**); sin embargo la información disponible en las superficies climáticas (imágenes raster) concuerda con lo obtenido a partir de las estaciones de la DGA Collacagua, Coposa, Parca y Mamiña ubicadas a pocos kilómetros del transecto Pozo Almonte-Salar del Huasco (**Figura 4a,b**); además, el espacio temporal cubierto por el registro climático concuerda con el tiempo que tarda en formarse una madriguera actual (~50 años) motivo por el que se asume una buena interpolación de los datos y, de manera adicional, se aprovecha la posibilidad de realizar comparaciones espaciales con un sesgo similar y de manera expedita.

4.3.4 Calibración polen-clima actual

A cada sitio de madriguera actual se le asignó un valor de precipitación anual y temperatura media anual. Los valores fueron calculados utilizando la extensión Análisis Espacial del software ArcGIS en función de los archivos raster elaborados por Hijmans et al (2005). Los datos climáticos cubren un rango de precipitación ascendente (P_{p_anual} : 64 a 96mm) y térmico decreciente (T_{media_anual} : 7,8 a 3,5°C) en relación a la altitud (**Figura 20e** y **Tabla 1**).

4.3.5 Polen fósil

Los datos de polen fósil fueron obtenidos a partir de 11 paleomadrigueras de roedores colectadas a 3.500 msnm y 21 paleomadrigueras ubicadas en torno a 3.700 msnm (Maldonado y González, 2012). Las muestras fueron datadas con el método de carbono 14 y el resultado de esta datación se presenta como el punto medio de las edades calibradas antes del presente; las edades calibradas cubren un rango temporal que va desde 54 a 3.849 años antes del presente para el sitio de 3.500 msnm y de 0 a 10.389 años antes del presente para el sitio ubicado a 3.700 msnm, cubriendo en conjunto una escala temporal que abarca prácticamente todo el Holoceno (**Tabla 2b,c**).

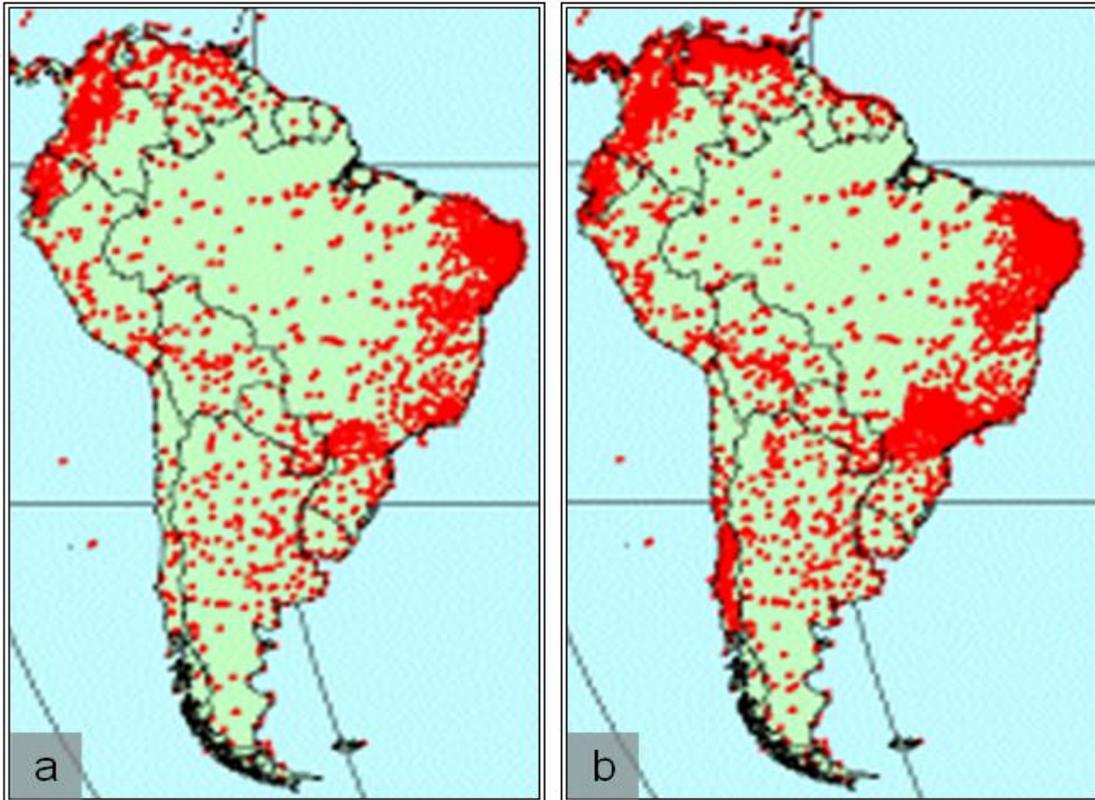


Figura 19: Distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas para interpolar los valores de: a) temperatura y b) precipitación. Fuente Hijmans et al (2005).

El procesamiento de estas madrigueras, además del protocolo descrito en el punto 4.3.2 (más atrás), incluyó la utilización de agua destilada durante 24-48hrs para disolver la matriz solidificada de la muestra fósil. En el registro fueron identificados 40 tipos polínicos, de estos 22 fueron identificados en el sitio más bajo y 33 tipos polínicos en el sitio de mayor altitud.

4.3.6 Función de transferencia Promedio Ponderado

La función de transferencia se llevó a cabo mediante la utilización de las dos formas del Promedio Ponderado (Ter Braak et al., 1986; Ter Braak et al., 1988; Ter Braak et al., 1993) con des-contracción (*desshrinking*) Inversa (Inv) y Clásica (Cla), utilizando el software C2 implementado por Juggins (2007). El set de calibración para la función de transferencia consiste en el porcentaje de 33 tipos polínicos de plantas terrestres identificados en las 11 muestras actuales y los valores de temperatura y precipitación para cada uno de los sitios donde éstas fueron colectadas (Maldonado y González, 2012).

El rendimiento (performance) de la función de transferencia fue evaluado utilizando la validación cruzada Bootstrap (10.000 iteraciones) (Birks, 1995; Juggins y Birks, 2012), luego fue seleccionado el modelo con el menor error de predicción (RMSEP), menor Sesgo Máximo (Boot_Max_bias), el mayor valor de relación (diferencia) cuadrática entre la predicción-bootstrap, los valores observados (R^2) y evaluando los gráficos de valores estimados versus los observados y el de valores residuales versus los observados (Birks, 1995).

4.3.7 Selección del modelo

Según el rendimiento obtenido en la regresión lineal de Promedios Ponderados (**Figura 20**) la mejor estimación climática actual obtenida a partir de la concentración de polen sería aquella que posee una des-contracción (*desshrinking*) Clásica (Cla), ya que ésta fue la que obtuvo el menor RMSEP y Sesgo Máximo, así como el menor R^2 . A través de esta opción la precipitación anual posee un error de predicción (RMSEP) de 5.57 milímetros, Sesgo Máximo de 5,92 mililitros y un coeficiente de determinación (R^2) entre los valores observados y predichos de un 0,81%. El rendimiento para la temperatura posee un error de predicción (RMSEP) de 7,07°C, Sesgo Máximo de 7,63°C y un coeficiente de determinación (R^2) de 0,86%.

La **Figura 20c,d**) muestra como los valores de las altitudes más bajas son sobre estimados, los de las muestras emplazadas hacia mayores altitudes subestimados y los datos estimados de las muestras ubicadas en el centro del gradiente poseen valores más cercanos a la realidad; este efecto resulta ser un fenómeno común en Promedio Ponderado y es necesario tenerlo en cuenta al momento de analizar los resultados de la reconstrucción climática.

Al comparar los datos observados en relación a los residuales (el valor observado menos el predicho), es posible observar más claramente cuáles son las principales muestras que inducen a estos problemas; los casos más acentuados están dados por las muestras número 10, 8 y 1 (3.250, 3.500 y 4.000 msnm respectivamente); y las muestras 5 y 3 (ubicadas en torno a 3850 msnm) también presentarían diferencias entre los valores estimados y observados, pero en un grado moderado; el resto de las muestras poseen un valor residual reducido (**Figura 20a,b**).

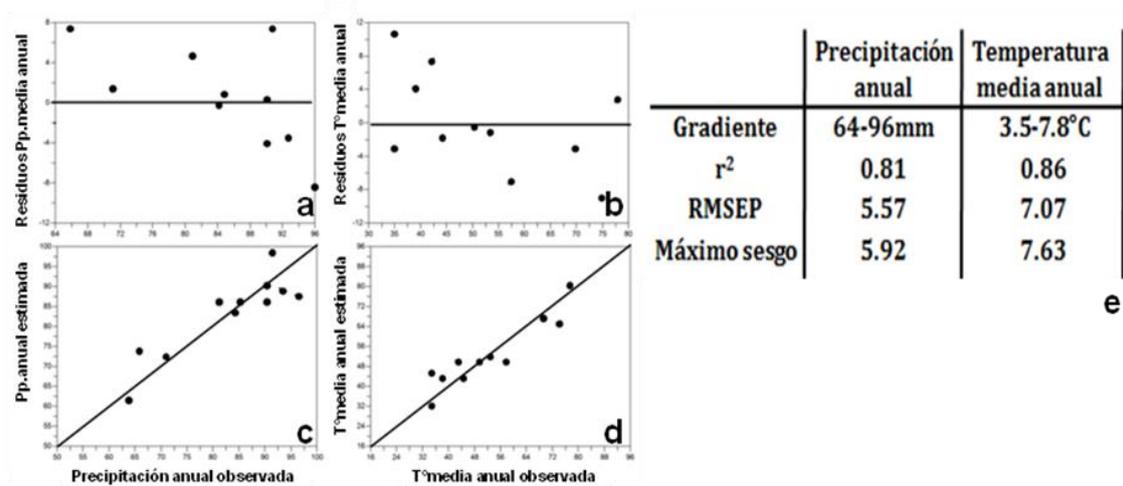


Figura 20: Rendimiento del modelo: a) comparación de precipitación anual observada (eje X) y valores residuales (eje Y); b) comparación de temperatura media anual observada (eje X) y valores residuales (eje Y); c) comparación de precipitación anual observada (eje X) y precipitación anual estimada (eje Y); d) comparación de temperatura media anual observada (eje X) y temperatura media anual estimada (eje Y) y, e) tabla de rendimiento estadístico de los resultados de modelos de regresión polen-clima/actual mediante precipitación anual y temperatura median anual utilizando una validación cruzada de Bootstrap. Donde: R^2 es el coeficiente de determinación y RMSEP, es la raíz cuadrada del error cuadrático medio de la predicción.

4.3.8 Variación espacial de los pisos de vegetación durante el Holoceno.

La variación espacial de los distintos pisos de vegetación durante el Holoceno (**Figura 28**, **Figura 29** y **Figura 30**) se estimó mediante la utilización de los datos de temperatura y precipitación reconstruidos para cada piso de vegetación a través de la extensión Análisis Espacial del software ArcGIS sobre las capas de información climática de Hijsmans et al (2005).

Capítulo 5: Resultados



5.1 Polen de madrigueras actuales

El diagrama polínico de las muestras analizadas grafica los principales taxa identificados (**Figura 21**); según esto, el dominio general de las madrigueras ubicadas a 3.945 y 4.050 msnm se encuentra representado por especies de Poaceae; en el sitio de menor altitud esta dominancia se encuentra asociada a *Senecio/Parastrephia* y *Baccharis*; mientras que en el de mayor elevación las Poaceae se encuentran acompañadas principalmente por Apiaceae.

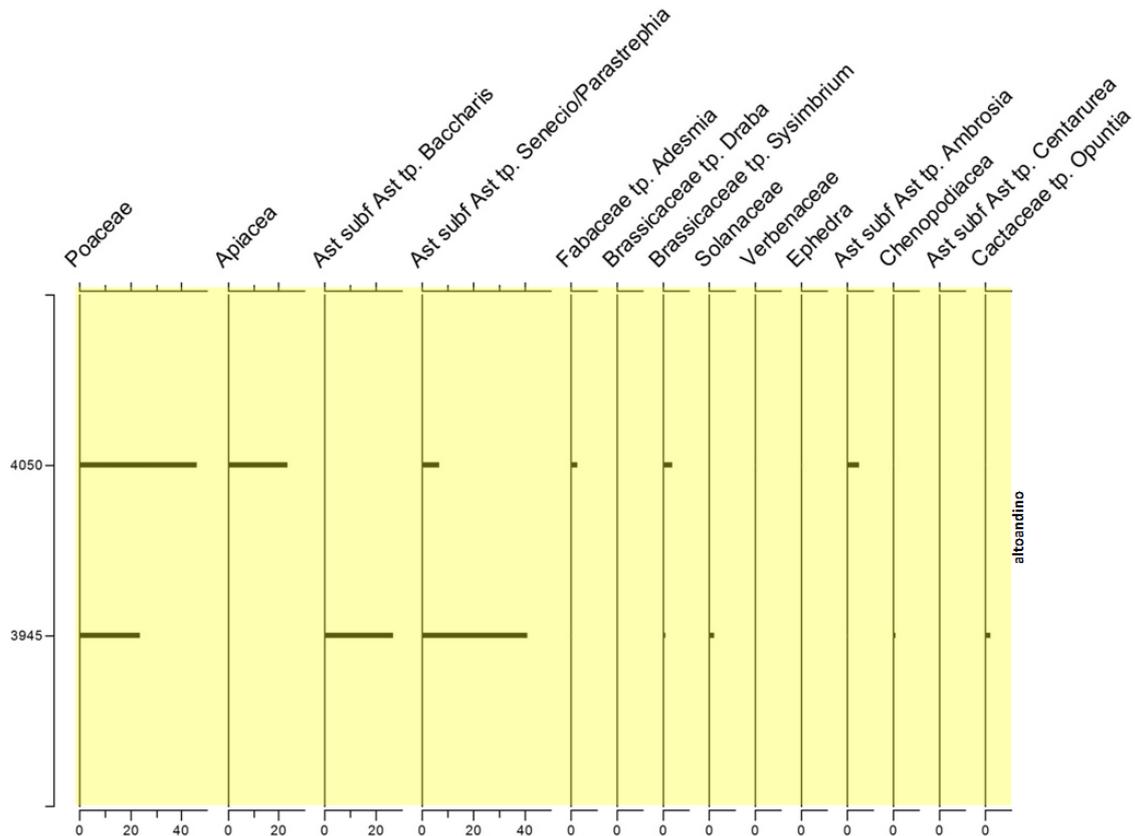


Figura 21: Diagrama de concentraciones polínicas de 2 madrigueras actuales ubicadas a 3.950 y 4.050 msnm.

El análisis conjunto de la concentración polínica de 11 madrigueras actuales de roedores (**Figura 22**) presenta una variación composicional que estaría representando adecuadamente la vegetación en relación a los cambios de altitud expuestos (anteriormente) en el punto 2.5, según lo cual es posible diferenciar los pisos de vegetación prepuneño dominando por polen de Chenopodiaceae acompañado, en menor proporción, de Asteraceae (entre 3.150 y 3.350 msnm), un piso puneño dominado por polen de *Senecio/Parastrephia*, *Baccharis* y *Fabaceae* (entre 3550 y 3950 msnm), una transición puneño/altoandino en donde la dominancia se comparte entre Poaceae y Asteraceae con una pequeña participación de *Sysimbrium* (sitios

ubicados en a) 3.950 y 4.050 msnm: Altos de Pica; y b) 3.945: Sur del cerro Huilla, sobre la Cordillera de los Andes) y, un piso altoandino dominado por una mayor concentración polínica de Poaceae y Apiaceae (sobre 4.050 msnm en el sector Sur del Salar del Huasco, sobre el macizo Andino).

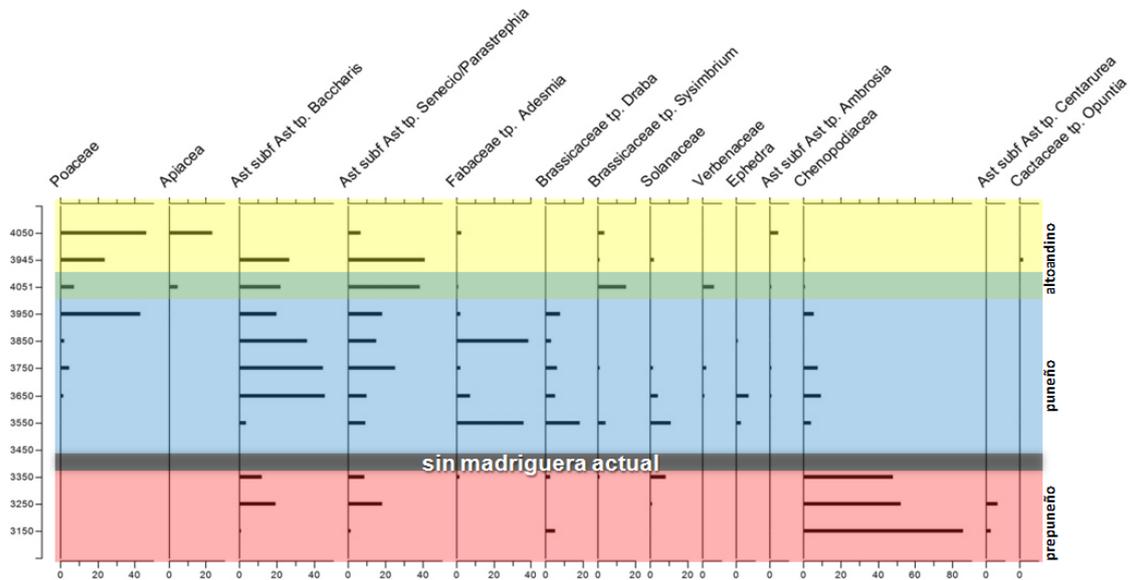


Figura 22: Diagrama de concentraciones polínicas de 11 madrigueras actuales ubicadas en un gradiente altitudinal en el transecto Pozo Almonte-Salar del Huasco.

5.2 Relación del polen con el clima actual

La caracterización climática de los sitios de madrigueras actuales corrobora un aumento de las precipitaciones y disminución de la temperatura con el incremento altitudinal, mientras la concentración de tipos polínicos (Tabla 1 y Figura 23) presenta una concordancia con la variación altitudinal de los pisos de vegetación descritos para el área de estudio.

5.2.1 Descripción climática de las zonas polínicas:

Zona z-1: entre 3.150 y 3.350 msnm las precipitaciones anuales fluctúan con la altitud de 64 mm a 71 mm y las temperaturas medias anuales de 7,8 a 7,0°C; a 3.150 msnm las condiciones se corresponden con una transición entre climas más desérticos dominados casi exclusivamente por polen de Chenopodiaceae (86%), posiblemente del género *Atriplex*, acompañados por menos de 3% de Asteraceae de los géneros *Senecio/Parastrephia* y *Baccharis*, 1,5 y 1,2% respectivamente; hacia mayores altitudes las Chenopodiaceae comienzan a disminuir gradualmente su participación

hasta prácticamente desaparecer; en su lugar especies de los géneros *Senecio/Parastrephia* y *Baccharis* cobran mayor relevancia, adicionalmente se observan algunas Fabaceae (posiblemente del género *Adesmia*) y Solanaceae (posiblemente de los géneros *Fabiana* ó *Solanum*).

Zona z-2: los 3.550 se presentan con un cambio significativo desde el punto de vista climático y de concentración polínica, lo que se debe posiblemente a los 200 mts. de diferencia con el sitio anterior. La precipitación anual es de 81 mm y la temperatura media anual de 5,7°C. Esta zona se encuentra caracterizada por el dominio de Fabaceae (36%) y la participación *Senecio/Parastrephia* (9,2%), Chenopodiaceae (4,3%) y *Baccharis* (3,8%), en este sentido se presenta como una transición entre las concentraciones polínicas presentes en las zonas I y III. En los censos de vegetación *Fabiana densa* es una de las especies dominantes, con coberturas que oscilan entre los 20 y 40% (González y Maldonado, 2010), sin embargo el espectro polínico de las Solanaceae en el registro actual solo alcanza un 16%.

Zona z-3: entre 3.650 y 3.750 msnm, la precipitación varía 1 mm entre cada sitio, desde 84 a 85 mm mientras que la temperatura desciende de 5,3 a 5,0°C. En la madriguera colectada a 3.650 msnm, el tipo polínico predominante corresponde a la Asteraceae del género *Baccharis* (46,2%), acompañada de Chenopodiaceae (9,7%), *Senecio/Parastrephia* (9,9%) y Fabaceae (7,3%), tipos polínicos acompañantes que en conjunto no superan el 27% del total; en este sitio las Poaceae comienzan a superar la unidad porcentual. A 3.750 msnm *Baccharis* disminuye ligeramente su participación a un 44,9%, mientras *Senecio/Parastrephia* incrementa su importancia con un 25,6% (16,7 puntos porcentuales más que el nivel inmediatamente inferior), Chenopodiaceae y Fabaceae siguen disminuyendo su participación, las Poaceae, sin embargo, comienzan a cobrar importancia con 4,8%. Esta zona podría ser relacionada fisonómicamente con el piso puneño.

Zona z-4: entre 3.850 y 4.051 msnm las precipitaciones ascienden de 90 a 96 mm y la temperatura desciende de 4,3 a 3,5°C. En el sitio de menor altitud, las concentraciones polínicas están dadas por el predominio de Fabaceae (38,8%), lo que representa el segundo *peak* de ésta familia en el registro, y *Baccharis* (36,3%) en compañía de *Senecio/Parastrephia*; a 3.950 msnm la mayor concentración es de Poaceae (43,1%), acompañada por *Baccharis* (20,1%) y *Senecio/Parastrephia* (18%); ya en el último sitio

Senecio/Parastrephia se encuentra dominando las concentraciones con un 38%, seguido de *Baccharis* con un 22%; resulta interesante la gran disminución de Poaceae a un escaso 7,3% y la aparición de Apiaceae (5%).

Zona z-5: entre 3.945 y 4.050 msnm; La madriguera ubicada a menor altitud se encuentra asociada a una precipitación anual de 90 mm y una temperatura media anual de 4,4°C, mientras que el sitio ubicado a mayor altitud se caracteriza por una precipitación anual de 91 mm y 3,5°C. La mayor concentración porcentual de tipos polínicos a 3.945 msnm recae sobre *Senecio/Parastrephia* (41.1%), *Baccharis* (26,9%) y Poaceae (24,1%); a los 4.050 msnm el panorama es completamente distinto pues el registro estaría indicando una mayor presencia de Poaceae (46,4%) acompañadas por Apiaceae (23,3%), el resto de los tipos polínicos presenta un fuerte descenso a valores inferiores al 7%. Estos registros fueron obtenidos en base a dos madrigueras actuales colectadas al Sur-Este del Salar del Huasco, sobre el cordón de la Cordillera de los Andes; el cambio en la tendencia de variación climática se explica por la diferencia latitudinal en relación con el resto (**Figura 2b**), sin embargo presenta un patrón similar de aumento en las precipitaciones y disminución de las temperaturas con el incremento altitudinal.

Altitud (msnm)	Poaceae	Apiaceae	Ast. A. tp. Ambrosia	Ast. A. tp. Senecio/Parastrephia	Ast. A. tp. Baccharis	Verbenaceae	Brassicaceae tp. Sisymbrium	Brassicaceae	Fabaceae tp. Adesmia	Solanaceae	Ephedra	Chenopodiaceae	Ast. A. tp. Centaurea	Cactaceae tp. Opuntia	Ast. A. Asteroidea	Subrepresentados	Precipitación anual (mm)	Temperatura media anual (°Cx10)	ZONA POLINICA
4050b	46.37	23.32	4.66	6.74	0.00	0.78	3.63	0.00	2.85	0.00	0.52	0.52	0.00	0.52	4.66	5.44	91	34.75	Z-5
3945b	24.08	0.00	0.28	41.08	26.91	0.00	1.13	0.00	0.28	1.98	0.00	0.85	0.00	2.27	0.00	1.13	90	44.25	Z-5
4051	7.31	4.97	0.88	38.30	21.93	6.43	15.50	0.00	0.88	1.17	0.00	1.17	0.00	0.29	0.00	1.17	96	34.92	Z-4
3950	43.09	0.27	0.27	18.43	20.05	0.00	0.00	7.86	1.90	0.00	0.54	5.69	0.00	0.00	0.54	1.36	93	38.58	Z-4
3850	2.23	0.00	0.56	15.08	36.31	0.56	0.00	3.07	38.83	0.28	0.84	0.56	0.00	0.00	0.00	1.68	90	42.50	Z-4
3750	4.62	0.00	0.99	25.41	44.55	2.31	0.99	6.27	2.31	1.65	0.00	7.92	0.00	0.00	0.66	2.31	85	50.25	Z-3
3650	1.45	0.00	1.20	9.88	46.02	1.20	0.00	5.30	7.23	5.54	6.75	9.64	0.00	0.00	2.89	2.89	84	53.33	Z-3
3550	0.29	0.00	0.29	9.22	3.75	0.00	4.32	18.44	36.02	15.85	2.59	4.32	0.00	0.58	0.86	3.46	81	57.08	Z-2
3450								S I N M A D R I G U E R A A C T U A L											Z-2
3350	0.52	0.00	0.52	8.79	11.89	0.00	1.03	2.58	1.55	9.56	0.26	48.06	0.00	0.00	9.04	6.20	71	69.83	Z-1
3250	0.00	0.00	0.00	18.58	19.59	0.00	0.00	0.25	0.00	1.27	0.00	52.16	6.11	0.00	0.00	2.04	66	74.75	Z-1
3150	0.00	0.00	0.29	1.43	1.15	0.00	0.00	5.44	0.00	0.57	0.00	85.96	2.58	0.00	0.00	2.58	64	77.58	Z-1

Tabla 1: Porcentajes del polen de madrigueras actuales y su relación con el clima actual. (Note que: las áreas de colores representan los distintos pisos de vegetación y los cuadros de colores los tipos polínicos representativos de estos pisos, siendo el rojo: prepuna, azul: puna y amarillo: altoandino).

5.2.2 Respuesta de los principales tipos polínicos en relación al clima

Se observa que la mayoría de los tipos polínicos se distribuye a lo largo de todo el registro, sin embargo estos presentan un incremento o disminución de sus concentraciones bajo determinadas condiciones climáticas (**Tabla 1** y **Figura 23**):

- Las Apiaceae solo se encuentran presentes en sitios con más de 91 mm de precipitación y temperaturas inferiores a 3,5°C, la ausencia o menor concentración en sitios con mayor precipitación permite establecer que este tipo polínico se encuentra limitado a sectores de bajas temperaturas y mayores precipitaciones.
- El tipo polínico *Senecio/Parastrephia* posee una gran variedad de especies asociadas, distribuyéndose en un amplio rango a lo largo del gradiente climático, sin embargo es posible observar una mayor presencia asociada al incremento de las precipitaciones. Este incremento se encuentra dominado por tres *peak* de concentración a 3.750, 4.051 y 3.945b msnm en cuya muestra es el tipo polínico dominante del registro posiblemente de las especies *Parastrephia lepidophylla* ó *P. quadrangularis* en los sitios más bajos y *Senecio puchii* ó *S. nutans* en los sitios más elevados.
- El género *Baccharis*, al igual que el anterior, se encuentra ampliamente distribuido, sin embargo la mayor concentración se restringe a sectores de condiciones métricas, en torno a 84 mm y 5,5°C. Las especies de este género se encuentran limitadas, aparentemente por la disminución de la temperatura y las precipitaciones.
- Las Chenopodiaceae se concentran en los sitios del transecto que poseen las mayores temperaturas y precipitaciones más escasas, de modo que ésta sería una familia muy resistente a la ausencia de lluvias y extremadamente sensible a la disminución de las temperaturas, reduciendo considerablemente su presencia por debajo de los 6°C.
- Las Fabaceae se presentan como una familia presente en todo el registro, sin embargo a 3.350 y 3.850 msnm supera el 30% de participación, lo que podría estar asociado al predominio de condiciones locales que favorezcan su desarrollo o a una tolerancia climática diferencial presentada por distintas especies o géneros de esta familia.
- Las Poaceae se distribuyen principalmente en los sectores con mayor precipitación y serían muy sensibles al incremento térmico. Su mayor

concentración se encuentra en sectores con temperaturas inferiores a 4°C y precipitaciones mayores a 90 mm.

- Las Solanaceae se presentan como un tipo polínico capaz de resistir temperaturas bajas y una escasez de precipitaciones, sin embargo la mayor concentración se encuentra asociada a sitios ubicados a 3.350 y 3.550 msnm, los que se caracterizan por un clima moderado con 71-81 mm de precipitación y 5,7- 7°C.

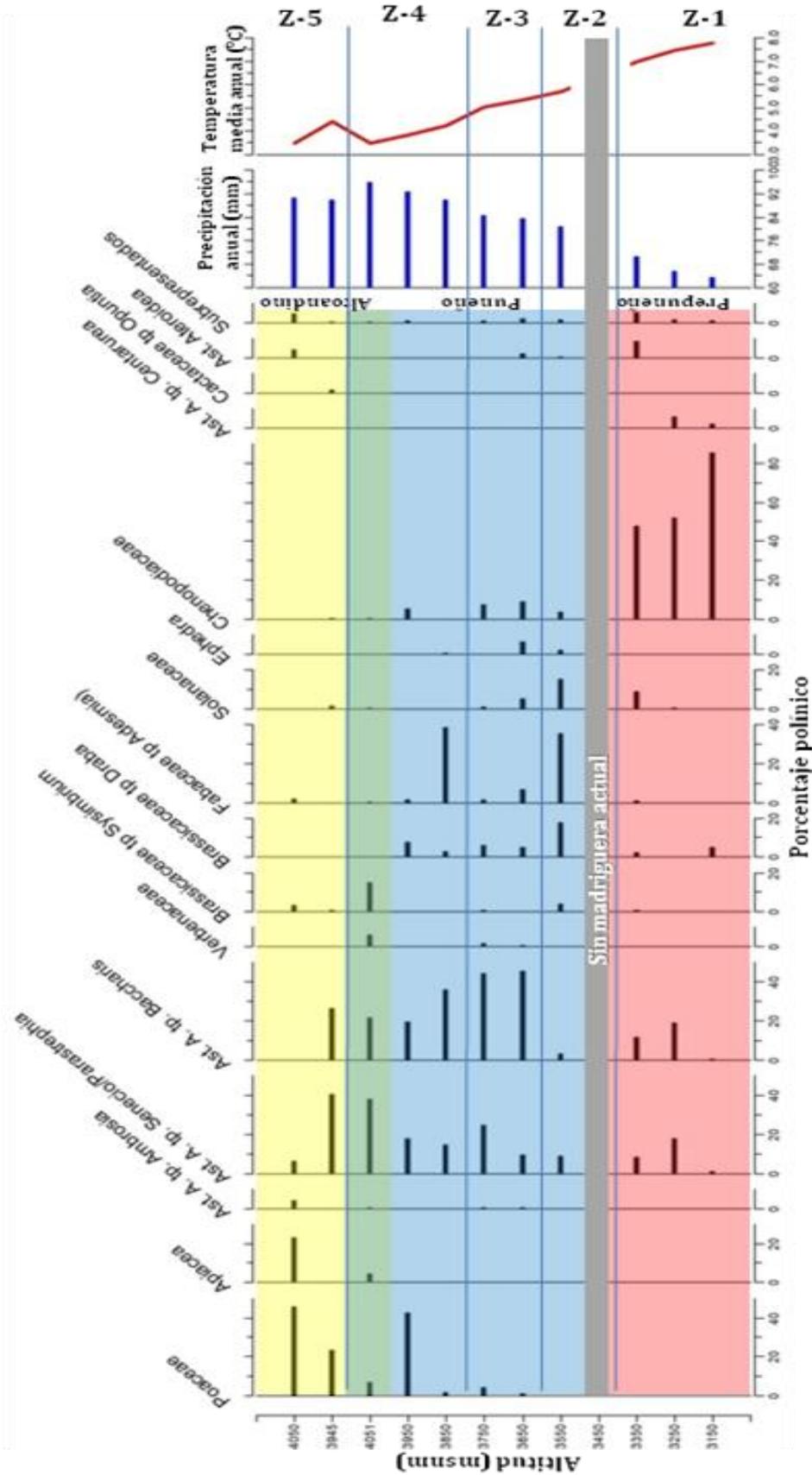


Figura 23: Gráfico de polen de madrigueras actuales y su relación con el clima actual. (Note que: 1) los valores del eje vertical indican la altitud de las muestras de madriguera actual y su escala se encuentra alterada; el eje horizontal indica los porcentajes de polen; 2) la temperatura se encuentra representada en °Cx10; 3)

5.3 Óptimo climático o Nicho óptimo para cada tipo polínico:

Los óptimos climáticos y rangos de tolerancia de cada uno de los tipos polínicos han sido agrupados siguiendo la clasificación altitudinal propuesta por Villagrán et al (1983), mostrando, en general, una clara coincidencia con los pisos de vegetación prepuneño, puneño y altoandino, por lo que los resultados derivados de este proceso estarían reflejando correctamente los procesos que condicionan la variación altitudinal de la vegetación.

Se observa, a grandes rasgos, una relación inversa entre la precipitación y temperatura (**Figura 24**) necesaria para el desarrollo óptimo de cada tipo polínico, de modo que aquellos taxa adaptados a menores montos de precipitación son, consecuentemente, aquellos que resisten las mayores temperaturas; esto permite establecer un rango de tolerancia para cada piso de vegetación, transformándolo en una especie de “*piso bioclimático*”: a) prepuneño: <78mm y >6°C; b) puneño: 78-90mm y 4,2-6°C; c) altoandino: >90mm y <4,2°C.

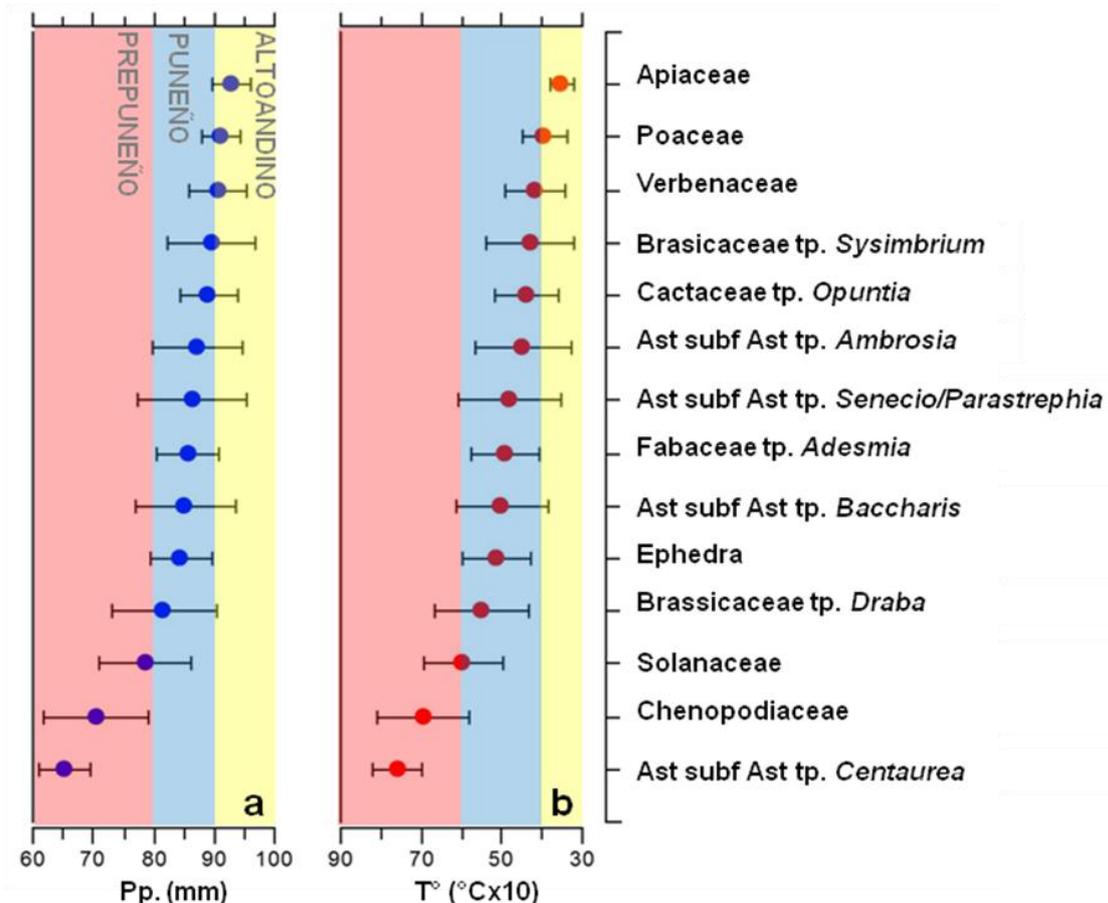


Figura 24: Gráficos con los rangos climáticos de los principales tipos polínicos, en donde se establece su distribución óptima y la tolerancia en relación a la precipitación (a) y temperatura (b) (Note que: el eje X de la figura b se encuentra invertido)

5.4 Reconstrucción de precipitación y temperatura media anual a 3.500 y 3.700 msnm:

Los modelos de reconstrucción climática indican una variación climática ocurrida durante el Holoceno, con una sucesión alternada entre períodos húmedos-fríos y secos-cálidos (**Figura 31**), esto fue medido cuantitativamente y los valores son presentados en la **Tabla 2**.

El Holoceno temprano, hacia los 10.000 años A.P. muestra una fase más húmeda y fría, con un incremento de precipitaciones anuales reconstruidas entre 4 a 6mm y una disminución de temperaturas medias anuales entre 0.5 y 1°C en relación a la actualidad.

Los resultados muestran que durante el Holoceno medio, entre 6.000 y 3.000 años A.P., las condiciones imperantes se encontraban dominadas por un escenario de menores precipitaciones y una variación térmica positiva; la intensidad de estas variaciones se presenta de manera diferencial en los sitios ubicados a 3.500 y 3.700msnm constituyendo una restricción en la influencia de las lluvias provenientes del Este, de modo que el sitio más bajo presenta condiciones mucho más secas que el de mayor elevación para un período de tiempo similar.

En el sector de menor altitud, se registran dos momentos: uno moderadamente más seco y frío a 3.849 años A.P., que con 80.5mm y 5.6°C presenta una disminución de 0.5mm y 0,8°C en relación a la actualidad; a 3.789 años A.P. con casi 69 mm de precipitación (12mm menos que en la actualidad) y una temperatura cercana a los 7.2°C (1.4°C superior) las condiciones se manifiestan en un período extremadamente árido. La gran variación climática experimentada a 3.500msnm en un período de 60 años se asocia a la influencia de un pulso menos seco y focalizado en el tiempo, que destaca dentro de las condiciones generales de mayor aridez.

A 3.700 msnm, las condiciones fueron similares a las actuales pero con una leve tendencia seca (entre 83 y 84 mm) y temperada (5.2°C) que representan una disminución de 1 y 2 mm de precipitación y un incremento de 0.2-0.3°C en relación a la actualidad.

Entre 2.400 y 500 años A.P. (cal) los impactos se presentaron de manera diferencial en ambos sitios, de modo que el sitio de menor altitud tuvo oscilaciones climáticas con momentos más húmedos (84-87 mm) y fríos (4.9-5.1°C) que se alternaron con períodos secos (73-74 mm) y más cálidos (6.5-6.6°C) en comparación con la actualidad, vinculado a un escenario general de mayores temperaturas y menores precipitaciones.

A 3.700 msnm se desarrollaron dos períodos de extraordinaria pluviometría que, con más de 92 mm anuales en 2.000 y 1.113 años A.P. (cal) indican las fases más húmedas del Holoceno para el presente registro; las precipitaciones promedio para este rango temporal, sin embargo, se encuentran en torno a los 88.5 mm anuales, mientras las temperaturas medias anuales son de 4.5°C y no alcanzan a superar los 4.9°, de modo que el registro indica un espacio temporal más húmedo y frío que el actual, con dos pulsos de extraordinaria precipitación y bajas temperaturas.

Los últimos quinientos años del registro estuvieron dominados por una nueva disminución de las precipitaciones, las que alcanzaron, en promedio, 84 mm y 78 mm anuales, mientras las temperaturas medias anuales estuvieron en torno a los 5.1° y 6°C en los sitios de mayor y menor altitud respectivamente, todo lo cual demuestra un período de mayor aridez que en la actualidad. No obstante lo anterior, ambos sitios presentan un pequeño pulso húmedo entre los 67 años y 134 años A.P. que se escapa a la tendencia y se encuentra en concordancia con otros estudios. Este período representa una etapa de transición hacia las actuales condiciones climáticas.

5.5 Comparación con estimaciones climáticas previas

5.5.1 Holoceno Temprano

El clima del Holoceno Temprano en los sectores del Altiplano Sudamericano ha sido descrito como una etapa de transición entre un período de gran humedad (entre ~18.000-~10.000 años A.P.) caracterizado por precipitaciones que habrían duplicado las concentraciones registradas en la actualidad (Latorre, 2006), y un período (desde ~9.000 años A.P.) en que se habría instaurado un escenario de extrema aridez (Maldonado et al., 2005).

DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL MADRIGUERAS ACTUALES				
Altitud	Pp_anual	Tmedia_anual	Pp_estimada	T_estimada
4051	96.0	34.9	87.73	45.73
4050	91.0	34.8	98.23	31.82
3950	93.0	38.6	89.43	42.73
3945	90.0	44.3	90.20	42.31
3850	90.0	42.5	85.77	50.13
3750	85.0	50.3	85.71	49.45
3650	84.0	53.3	83.85	51.77
3550	81.0	57.1	85.40	49.77
3450	SIN MADRIGUERA ACTUAL			
3350	71.0	69.8	72.14	66.81
3250	66.0	74.8	73.43	65.88
3150	64.0	77.6	61.95	80.06

EDAD CALIBRADA (A.P.) Y VARIABLES RECONSTRUIDAS MADRIGUERAS FÓSILES UBICADAS EN TORNO A 3.700 msnm:							
Muestra	Edad 14C	Error	Edad Cal A.P.	Precipitación anual	variación	Temperatura media anual	variación
SH119	moderna	-	0	82.77	-2.23	52.33	2.68
SH120C	60	30	64	84.61	-0.39	50.74	0.49
SH116	70	30	66	82.34	-2.66	53.49	3.24
SH123	110	30	134	86.74	1.74	47.63	-2.62
SH524	430	25	470	80.88	-4.12	55.35	5.10
SH521	460	25	493	85.30	0.30	49.78	-0.47
SH522	470	30	497	86.67	1.67	48.40	-1.85
SH118	730	30	620	86.32	1.32	48.05	-2.20
SH177a	970	30	846	86.49	1.49	48.52	-1.73
SH120A	1220	30	1089	89.91	4.91	42.97	-7.28
SH117	1230	30	1113	92.97	7.97	37.57	-12.68
SH170c	1620	25	1464	88.67	3.67	44.61	-5.64
SH519	1910	30	1789	86.69	1.69	48.12	-2.13
SH124	2100	30	2000	93.13	8.13	37.01	-13.24
SH111A	2180	30	2096	87.02	2.02	47.06	-3.19
SH170b	3440	30	3628	82.98	-2.02	52.84	2.59
SH172	3600	25	551	85.80	0.80	48.67	-1.58
SH509	3730	30	4010	84.00	-1.00	51.54	1.29
SH515	5160	30	5819	83.33	-1.67	52.40	2.15
SH113C	9040	40	10096	88.53	3.53	45.03	-5.22
SH113A	9280	40	10389	91.26	6.26	40.66	-9.59

EDAD CALIBRADA (A.P.) Y VARIABLES RECONSTRUIDAS MADRIGUERAS FÓSILES UBICADAS EN TORNO A 3.500 msnm:							
Muestra	Edad 14C	Error	Edad Cal A.P.	Precipitación anual	variación	Temperatura media anual	variación
SH1612A	80	25	54	75.31	-5.03	62.13	5.05
SH164	90	30	67	82.00	1.00	54.29	-2.80
SH604	189	25	150	78.88	-2.12	58.59	1.51
SH158	300	20	313	77.23	-3.77	60.38	3.30
SH146A	430	20	474	75.61	-5.39	62.54	5.46
SH162	820	30	703	72.87	-8.13	66.25	9.16
SH163	860	20	724	84.20	3.20	51.44	-5.64
SH146B	1450	20	1305	73.96	-7.04	64.87	7.79
SH526	2120	25	2033	86.39	5.39	48.69	-8.40
SH178D	3580	25	3789	68.75	-12.25	71.53	14.45
SH178C	3610	25	3849	80.53	-0.47	56.29	-0.79

Tabla 2: a) rangos climáticos observados y estimados cubiertos por los sitios de madriguera actual; b y c) edad radiocarbónica y valores climáticos reconstruidos en base a paleomadrigeras colectadas en torno a 3.500 y 3.700msnm (note que las precipitaciones están expresadas en milímetros (mm) y las temperaturas en grados Celsius (°C) por diez).

La reconstrucción climática realizada en base a paleomadrigeras demuestra que esta transición presentó un incremento en las precipitaciones de 3-6mm y una disminución térmica de entre 5 y 9°C (**Figura 25**), que concuerda con la existencia de un período (húmedo) de transición en los Andes Centrales (~10.000 años A.P.) establecido por antiguos incrementos del volumen hídrico en cuerpos de agua situados en el Altiplano.

En el lago Titicaca la variación se infirió a partir de modificaciones en la concentración de diatomeas y la identificación de paleo líneas de costa; en el lago Chungará, el incremento lacustre se deduce por la reducida cantidad de carbonatos (Pueyo et al., 2011) (**Figura 27b**); el avance hacia altitudes bajas de polen fósil de Poaceae, característico de pisos de vegetación más elevados, en las cercanías del Salar del Huasco (Maldonado y González, 2012) y el incremento en la abundancia de macrorestos vegetales en las cercanías del Salar de Atacama (Latorre et al., 2003)

sugieren que este período se habría caracterizado por un incremento de precipitaciones.

5.5.2 Holoceno Medio

Las estimaciones climáticas inferidas para el Holoceno Medio se encuentran dominadas por una marcada controversia entre quienes lo han definido como un período más húmedo a partir del aumento en la concentración de macrorestos vegetales en las cercanías del Salar de Atacama entre 7.600-6.300 y entre 4.300-3.000 años A.P. (Latorre et al., 2003); una segunda postura sugiere la existencia de un período más árido que el actual, basados en el incremento de isótopos de oxígeno contenidos en carbonatos del Lago Chungará entre 7.300 y 3.500 años A.P., cuya concentración habría alcanzando valores cercanos a los actuales alrededor de 6.000 años A.P. (Pueyo et al., 2011), el avance del piso prepuneño hacia mayores altitudes asociado a una disminución de las precipitaciones, entre 6.000 y 3.300 años A.P. en el sector Altiplánico de Iquique (Maldonado y González, 2012), en Laguna Miscanti, cercana al Salar de Atacama, el desarrollo de aguas someras (de gran salinidad) entre 8.000 y 3.600 años A.P. sería el reflejo de un período extremadamente árido (**Figura 27b,c**) (Grosjean, 2001).

La depositación de sedimentos fluvio-lacustres en el valle de Puripica ha sido interpretada como evidencia de aumento en la aridez, asociada a un incremento de la escorrentía superficial como consecuencia de una escasa cobertura vegetal; en este valle los sedimentos dan cuenta de un proceso con grandes tormentas ocurridas con muy poca frecuencia (período de retorno de alrededor de 1.000 a 500 años) hace 5.080, 3.800 y 3.300 años A.P. La concentración de procesos de depositación, en lugar de erosión, da cuenta de un período marcado por una extrema aridez (Grosjean et al., 1995).

El presente registro indica un período de aridez similar al actual entre 3.000 y 6.000 años cal A.P., con un momento de gran incremento en las condiciones de sequía (3.789 años cal A.P.), estas circunstancias habrían afectado las estrategias de germinación de las plantas anuales así como el florecimiento y supervivencia de las especies perennes causando un gran impacto en la distribución y disponibilidad de los

recursos, reflejado en la ausencia de registros arqueológicos en este rango temporal, denominado “silencio arqueológico” (Grosjean et al., 1994) (**Figura 25**).

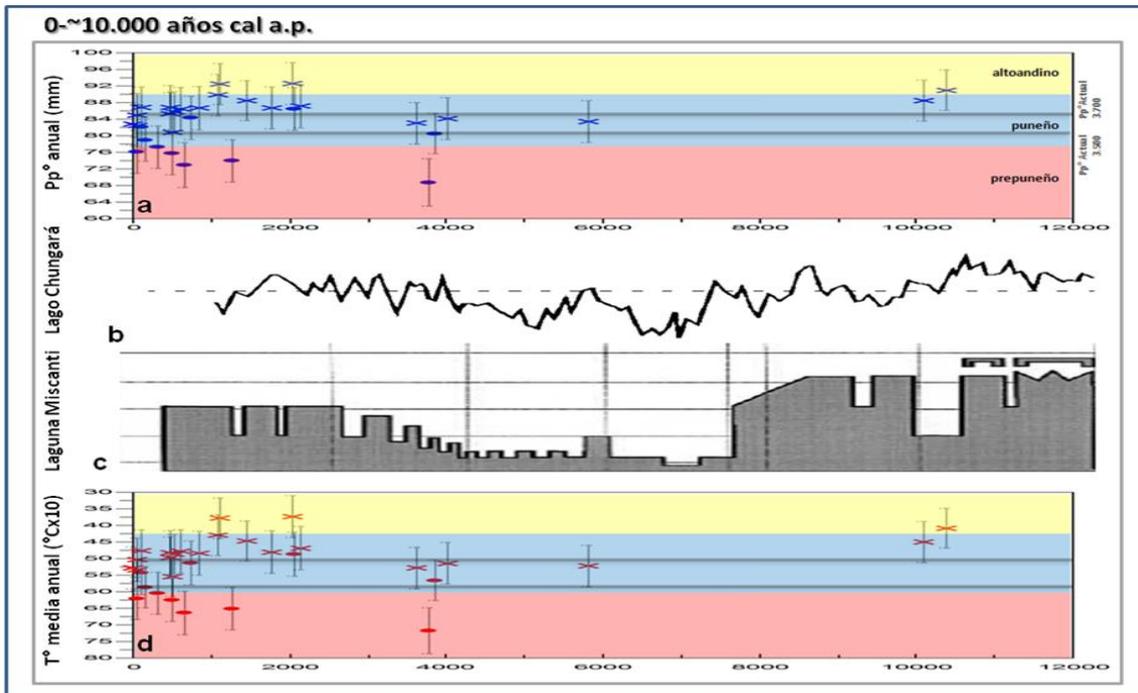


Figura 25: Comparación de la reconstrucción climática con estimaciones previas y variación de los pisos de vegetación a lo largo del tiempo: a) reconstrucción de precipitaciones en base a polen de madrigueras fósiles (0 a ~10.000 años A.P.), b) variación en la disponibilidad de agua del Lago Chungará (Giralt et al., 2008; Pueyo et al., 2011), c) variación en el nivel del agua en Laguna Miscanti (Grosjean et al., 2001), d) reconstrucción de temperaturas en base a polen de madrigueras fósiles (0 a ~10.000 años A.P.)

5.5.3 Holoceno Tardío

El Holoceno Tardío se encuentra caracterizado por una serie de variaciones climáticas que han sido interpretadas como un período compuesto por una fase inicial con predominio de las precipitaciones seguida de una fase terminal donde se habrían instaurado las actuales condiciones climáticas; éstas han sido reconstruidas con buena resolución gracias a la conservación y disponibilidad de los registros obtenidos en este rango temporal (**Tabla 2**).

La proliferación de la actividad biológica sugiere un incremento de la actividad fluvial en el sitio de Quebrada Maní como resultado de una mayor concentración de períodos lluviosos en zonas Altiplánicas; estos momentos se han asociado con el inicio del *Período Cálido Romano* (PCR, 2.500-2.040 años A.P.), la transición *Período Cálido Romano-Período Frío de la Edad Oscura* (PCR-PFEO, 1.615-1.350 años A.P.) y con la

Anomalía Climática Medieval (ACM, 1.050-680 A.P.) (Gayó et al., 2012) (**Figura 26b**); un incremento en la presencia de polen de Poaceae en las cercanías del Salar del Huasco, sugiere la expansión del piso Altoandino hacia menores altitudes como respuesta al aumento de las precipitaciones, el descenso del piso Altoandino habría tenido lugar en torno a 2.400 y 1.000 años A.P. (Maldonado y González, 2012) y que se manifiesta en la reconstrucción como el período de mayor concentración en las lluvias de verano (**Figura 26a**), la presencia de taxa de mayores altitudes en las cercanías del Salar de Atacama entre 1.800 y 1.200 años A.P. (Latorre et al., 2003); el escenario general de incremento en las precipitaciones habría estado interrumpido por al menos dos momentos de gran aridez (2.230-1.615 años A.P. y 1.350-1.050 años A.P.), lo que se estaría reflejando en una escasez de registros de ocupación humana datados en esos rangos (Gayó et al., 2012) (**Figura 26b**).

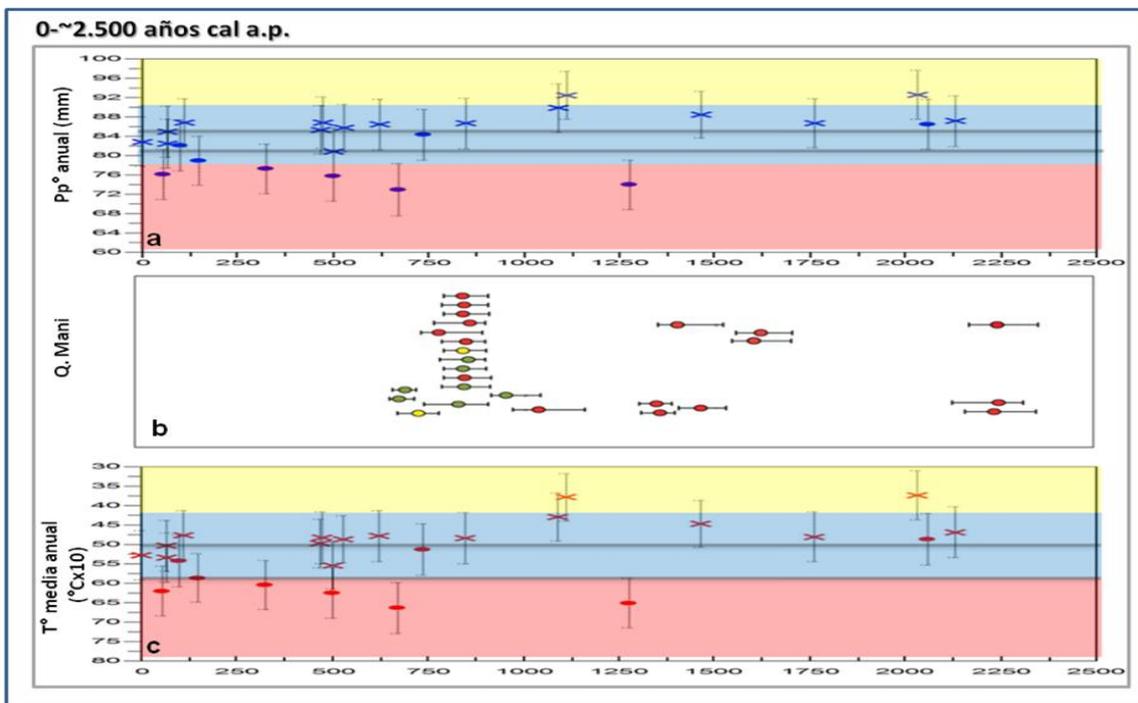


Figura 26: Comparación de la reconstrucción climática con estimaciones previas y variación de los pisos de vegetación a lo largo del tiempo: a) reconstrucción de precipitaciones en base a polen de madrigueras fósiles (0 a ~2.500 años A.P.), b) concentración de registros como evidencia de ocupaciones humanas en Quebrada Maní (Gayó et al., 2012), c) reconstrucción de temperaturas en base a polen de madrigueras fósiles (0 a ~2.500 años A.P.)

Una fase de transición hacia el contexto climático del presente ha sido inferida por el predominio de Asteraceae-Asteroidea, acompañado por un incremento de Fabaceae en el transecto Pozo Almonte – Salar del Huasco, entre 850 y 650 años A.P. (Maldonado y González, 2012) asociada a una variación ligeramente más húmeda y

seca que la actual (**Figura 27**), luego de lo cual se habrían instaurado las actuales condiciones de aridez deducidas a partir la ausencia de registros de ocupación humana en el sector de Q. Maní luego de los 600 años A.P. (Gayó et al., 2012), la presencia de vegetación similar a la actual en las cercanías del Salar de Atacama entre 1.000 años A.P. y la actualidad (Latorre et al., 2003).

Adicionalmente, la reconstrucción climática a través de análisis en la variación de anillos de crecimiento en individuos de *Polylepis tarapacana* ha permitido obtener una resolución interanual, con gran detalle de los procesos de aridez y humedad ocurridos durante los últimos 700 años en los sectores Altiplánicos; según estos, el predominio en las condiciones de aridez habría ocurrido durante 650-500, 550-350, 200-150 y <30 años A.P., por el contrario durante 550-500, 400-380, 360-250 y 190-80 años A.P. las condiciones se habrían caracterizado por un mayor concentración de precipitaciones que en la actualidad (Morales et al., 2012) (**Figura 27b**).

La variación de la concentración polínica en un testigo de hielo del volcán Sajama entrega un registro continuo con muy buena resolución de las condiciones climáticas predominantes durante los últimos 400 años en los sectores Altiplánicos; dicho trabajo entrega indicios sobre la existencia de una *Pequeña Edad del Hielo* (PEH) con una fase de gran humedad entre 350 y 250 años A.P., seguida de una fase de incremento en la aridez entre 250 y 70 años A.P., luego de los cual se habrían instalado condiciones moderadamente más húmedas para concluir con un proceso de aridez similar al actual (Liu et al., 2005).

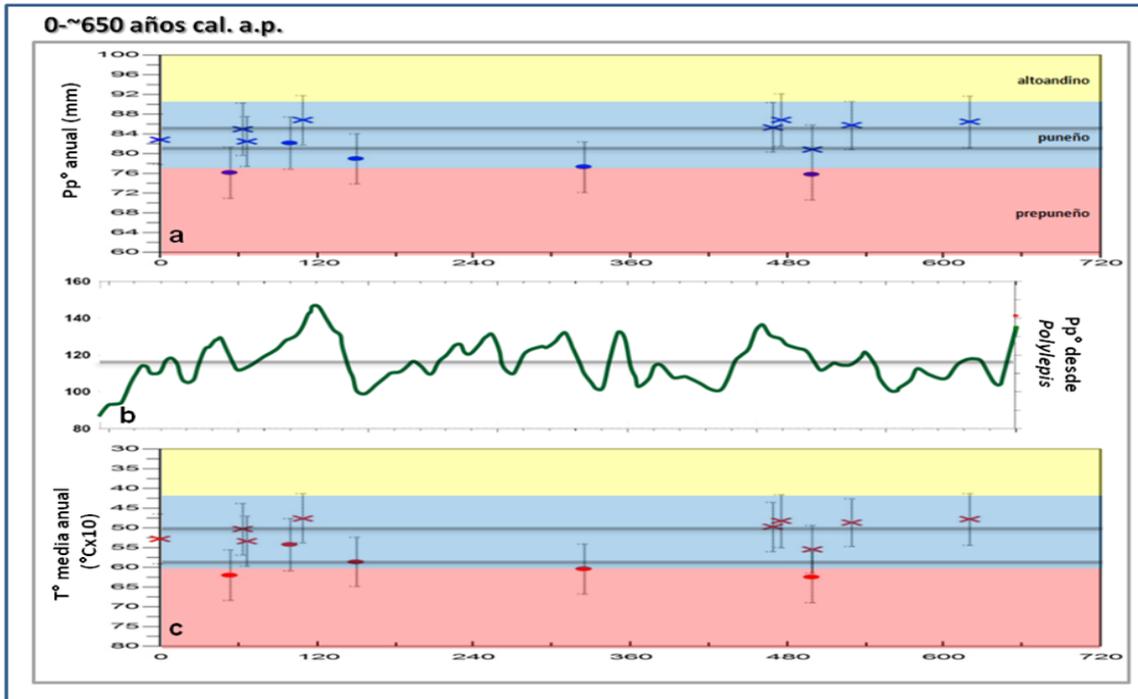


Figura 27: Comparación de la reconstrucción climática con estimaciones previas y variación de los pisos de vegetación a lo largo del tiempo: a) reconstrucción de precipitaciones en base a polen de madrigueras fósiles (0 a ~650 años A.P.), b) variación interanual de las precipitaciones mediante registros de *P. tarapacana* (Morales et al., 2012), c) reconstrucción de temperaturas en base a polen de madrigueras fósiles (0 a ~650 años A.P.)

En términos generales la reconstrucción climática realizada demuestra la existencia de un período húmedo y frío (~10.000 años A.P.) seguido de una disminución de las precipitaciones e incremento de las temperaturas durante el Holoceno Medio representada en cinco muestras del presente registro (6.000-3.000 años A.P.), posteriormente la influencia de las lluvias tuvieron un impacto positivo que favoreció del desarrollo de la vegetación hacia sectores elevados y una fuerte disminución de la lluvia con importantes impactos hacia los sitios ubicados aguas abajo (2.400-650 años A.P.); finalmente la temperatura presenta un importante incremento, mientras las precipitaciones disminuyeron hasta alcanzar condiciones similares a la actualidad (Figura 25).

5.6 Variación espacial de los pisos de vegetación durante el Holoceno.

La reconstrucción climática realizada a partir de la variación en la concentración de polen fósil a lo largo del Holoceno y el establecimiento de los rangos de tolerancia de cada piso de vegetación (en el área de estudio) reflejan una modificación altitudinal en la composición de la vegetación como respuesta a la evolución temporal de las condiciones climáticas; estos resultados ilustran una variación espacial de los distintos pisos de vegetación presentes en el área de estudio a lo largo del tiempo en relación a la distribución potencial actual de éstos (**Figura 28**).

Efectivamente, según lo expuesto por Maldonado y González (2012), el incremento en la concentración de polen de Poaceae se vincula con un avance del piso altoandino hacia menores altitudes, bajo condiciones climáticas dominadas por mayores precipitaciones y temperaturas más bajas durante el Holoceno Temprano (~10.000 años A.P.); el lapso más húmedo y frío reconstruido (~2.000 años A.P.) (**Figura 29**) coincide, también, con la mayor concentración de Poaceae del registro (Maldonado y González, 2012) y se expresa como un avance del piso altoandino hasta altitudes cercanas a 3.700 msnm y como un predominio del nivel superior del piso puneño hacia los 3.500msnm.

Durante los períodos de mayor aridez la variación climática alcanzó niveles de cambio mucho mayor que los experimentados durante momentos húmedos; la composición de la vegetación presenta drásticas modificaciones en ambos sitios, con una dominancia de *Baccharis*, *Parastrephia*, *Chenopodiaceae* y *Fabaceae* y una escasa diversidad, representando el avance del piso prepuneño hacia altitudes mayores que las actuales (**Figura 30**).

El resto del tiempo la vegetación se mantuvo relativamente constante, con una composición específica más variada cuya dominancia estuvo dada principalmente por la concentración polínica de *Baccharis* y *Parastrephia* variando, al igual que en la actualidad, levemente al interior del piso.

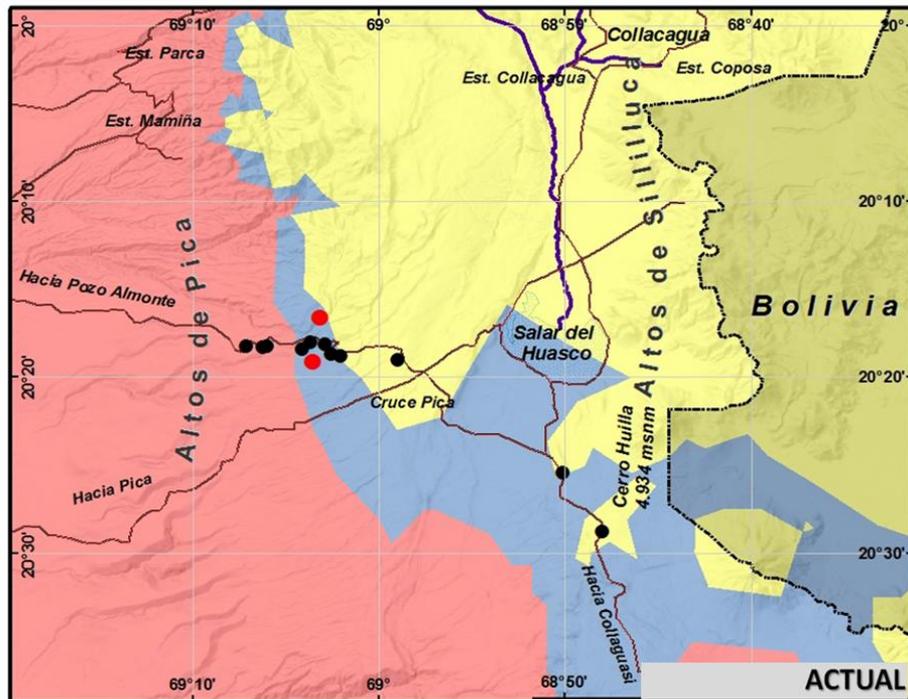


Figura 28: Distribución de los pisos de vegetación en base a rangos de tolerancia climática de cada tipo polínico y su variación espacial en la actualidad.

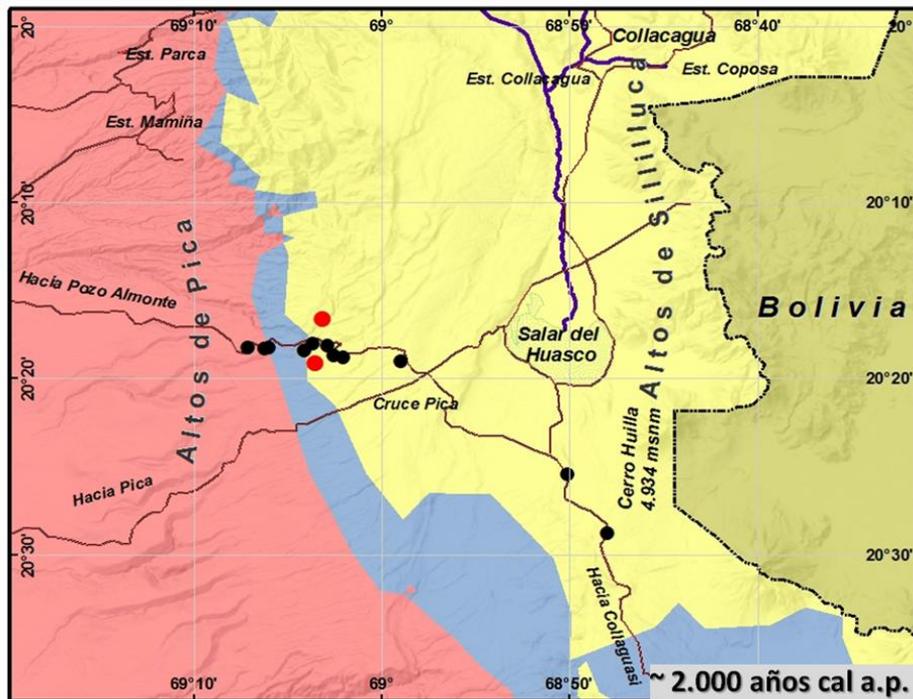


Figura 29: Distribución de los pisos de vegetación en base a rangos de tolerancia climática de cada tipo polínico y su variación espacial en el momento de mayores precipitaciones reconstruido por los datos de esta memoria (2.000 años A.P.)

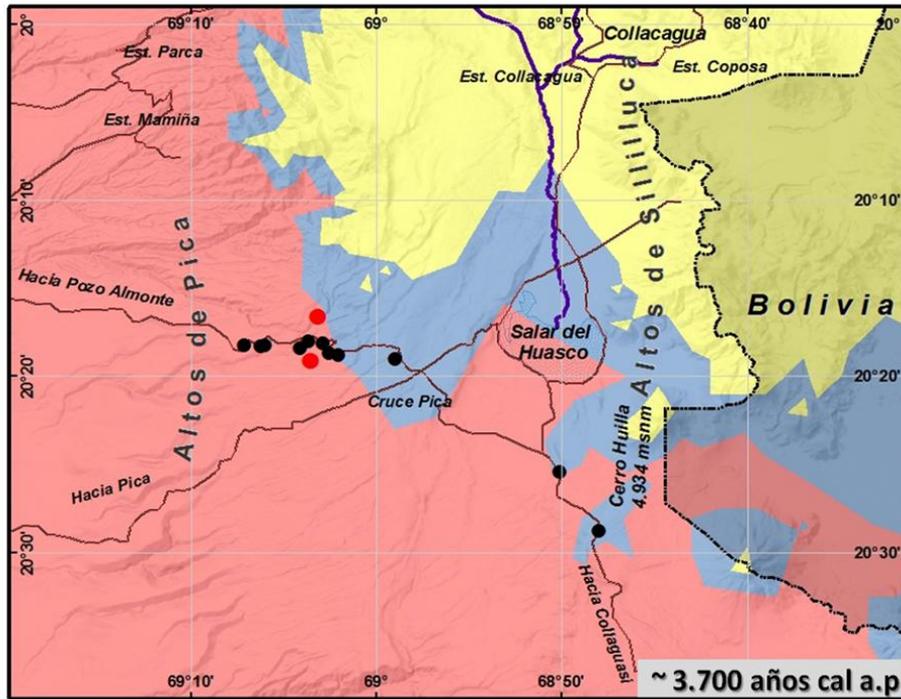


Figura 30: Distribución de los pisos de vegetación en base a rangos de tolerancia climática de cada tipo polínico y su variación espacial en el momento de mayor aridez reconstruido por los datos de esta memoria (3.700 años A.P.)

Capítulo 6: Discusión y Conclusión



6.1 Discusión

6.1.2 Clima actual y su representación a través de la concentración polínica en madrigueras actuales:

6.1.2.1 Clima actual

La interpolación de datos climáticos de Hijmans et al (2005) posee una resolución espacial de 30 segundos de arco ($\sim 1\text{km}^2$); gran nivel de detalle si se compara con los 10 minutos de arco ($\sim 17\text{km}^2$) obtenida en trabajos previos (New et al., 2002). Esta característica es de gran relevancia ya que surge como una excelente alternativa para suplir la falencia en áreas con escasas o nulas estaciones meteorológicas (las zonas del norte de Chile en general y los sectores altiplánicos en particular), o en sectores limítrofes donde comúnmente se omite (o desconoce) la información climática de los países vecinos. Aun cuando existen otros trabajos que podrían tener mayor precisión como por ejemplo el de Uribe et al (2012), esta base de datos posee una cobertura global y se encuentra a libre disposición de los usuarios (<http://www.worldclim.org>.) facilitando la implementación de su información según los propósitos de cada uno, de modo que los resultados obtenidos a partir de su utilización pueden ser fácilmente comparables con trabajos realizados por diferentes autores.

Durante la utilización de este tipo de información hay que considerar que sus datos son inferencias realizadas a partir de datos meteorológicos reales y que corresponden, por tanto, a una aproximación de la realidad; además es necesario tener en cuenta que los estos pertenecen a una representación simplificada del paisaje, en este caso se asume un valor homogéneo para toda el área cubierta por un pixel de un $\sim 1\text{km}^2$, valores que en la práctica presentan oscilaciones de un extremo a otro del pixel dependiendo de las condiciones del relieve; es por esta razón que la utilización de interpolaciones climáticas debe ser utilizada como un material complementario en sitios con escasa información, hay que tener extrema precaución en su manejo y se debe evaluar la confianza y veracidad de estos. Siempre se deben contrastar con datos “reales” obtenidos a partir de una o, según la disponibilidad, más estaciones climáticas; en el caso de este trabajo los datos inferidos poseen una gran concordancia con los registros obtenidos por estaciones climáticas ubicadas en las cercanías del área de estudio.

La información climática utilizada corresponde a la interpolación de datos en un rango temporal de 50 años (1950-2000) (Hijmans et al., 2005) e incorpora registros de estaciones que han estado activa por al menos diez años cuya resolución temporal es complementada con la agregación y análisis conjunto de un gran número de estaciones permitiendo la vinculación entre éstas y generando una reunión de datos que componen el denominado “clima actual”; la **Figura 5** ejemplifica la utilización de registros de corta duración para la elaboración de la condición térmica actual en un gradiente altitudinal actual del Altiplano chileno.

Los valores climáticos utilizados representan el punto medio entre años lluviosos y años secos; alguno de los cuales se han caracterizado por la gran concentración de precipitaciones o, en caso contrario, por momentos de extraordinarias sequías (**Figura 4c**) responsables de grandes impactos en las zonas altiplánicas del país (Van Kessel, 1985) que han sido asociadas a la ocurrencia del fenómeno ENOS (Minvielle y Garreaud, 2011) destacando, por su intensidad, los eventos ocurridos durante los años 1982-1983 (Francou y Pizarro, 1985), y 1997-1998 (NOAA online: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei.ext/>); períodos en que las estaciones de la DGA, incluidos en esta memoria, registran una disminución promedio de las precipitaciones de un 44% y 53% respectivamente y han sido considerados por varios autores (como por ejemplo Aceituno (1998)) como los dos eventos ENOS más intensos del siglo XXI.

Las precipitaciones de invierno, principalmente en forma de nieve, desafortunadamente no se encuentran representadas adecuadamente por los datos de las estaciones climáticas (Vuille y Ammann, 1997); sin embargo éstas resultan ser uno de los factores condicionantes en el desarrollo de la vegetación en el Altiplano, pues durante el tiempo en que éstas ocurren el paisaje se encuentra casi totalmente cubierto de hielo; esta condición modera y regula el desarrollo de la vida permitiendo la sobrevivencia solo de aquellos organismos y especies capaces de soportar tales temperaturas, por lo que una correcta reconstrucción de las condiciones climáticas requiere incorporar este fenómeno; desafortunadamente los datos climáticos disponibles carecen de esta información y es una variable que no ha sido incorporada en los trabajos de reconstrucción de paleoambientes. Así mismo, se reconoce que otros factores como la ecología de la vegetación, la fauna y las propias conductas sociales de las poblaciones humanas podrían tener gran injerencia sobre las

respuestas biológicas, y por tanto climática, de cada especie y que muchas veces son dejadas de lado por la complejidad de modelar su integración

6.1.2.2 Polen actual

La concentración del polen de madriguera actual, al igual que el proveniente de madrigueras fósiles, es el reflejo de la vegetación ubicada entre 100 y 200 m alrededor del lugar de depositación y corresponde a una imagen en el tiempo descrito cuyo rango de representación temporal aún no ha sido completamente establecido y se estima en unos 50 a 100 años (y no menos de 10) (Grosjean et al., 2003; Latorre et al., 2003); al igual que el “clima actual” representa el punto medio de una vegetación influenciada por la sumatoria de años secos y años húmedos; en consecuencia la variación de la vegetación inferida a través de registros de polen fósil indicaría condiciones a) similares al presente, en que el desarrollo de la vida se limitó solo a sitios con influencia hídrica directa, b) dominada por una gran concentración de años lluviosos, posibilitando el desarrollo más allá de los actuales límites conocidos, ó c) la sumatoria de años con sequía caracterizados por un escaso, concentrado y delimitado desarrollo biótico.

Antes de reconstruir el clima del pasado se evaluó la forma en que el polen de madriguera actual refleja el clima del presente; la estimación climática de cada muestra se realizó en base a la concentración cada tipo polínico vinculado previamente, con un valor de temperatura y precipitación. Los principales tipos polínicos que influyen en el valor climático final de cada muestra ordenados de manera descendente según su precipitación óptima y ascendentemente según su temperatura óptima son: Apiaceae (91,9mm – 3,5°C), Poaceae (91,3mm - 3,9°C), Brassicaceae tp. *Sysimbrium* (91,2mm – 4,1°C), Asteraceae-Asteroidea tp. *Senecio/Parastrephia* (86,7mm – 4,8°C), Fabaceae tp *Adesmia* (85,7mm – 4,9°C), Asteraceae-Asteroidea tp. *Baccharis* (85,4 – 5°C), Brassicaceae tp. *Draba* (81,8mm – 5,5°C), Solanaceae (78,6mm - 6°C) y Chenopodiaceae (69,2mm – 7,1°C) (**Figura 24**).

Los valores asociados a cada tipo polínico corresponden a las condiciones climáticas óptimas bajo las cuales se presenta la mayor concentración de cada uno de estos al interior del gradiente climático considerado (64-96mm y 3,5-7,8°C) y no representan, por tanto, un óptimo climático que pueda ser extrapolado fuera de este rango.

De las once muestras utilizadas solo cuatro presentaron una estimación totalmente coherente con la realidad (muestras ubicadas a 3.350, 3.650, 3.750 y 3.945msnm; cuya variación es $\bar{x}=0,5\text{mm}$, $>0,1\text{mm}$, $<1.1\text{mm}$ y $\bar{x}=-0,2^{\circ}\text{C}$, $>-0,1^{\circ}\text{C}$, $<0,3^{\circ}\text{C}$); cuatro poseen una subestimación de las precipitaciones y sobreestimación de la temperatura (muestras ubicadas a 3.150, 3.850, 3.950 y 4.051msnm; cuya variación es $\bar{x}=-4,5\text{mm}$, $>-2\text{mm}$, $<-8\text{mm}$ y $\bar{x}=0.6^{\circ}\text{C}$, $>0.2^{\circ}\text{C}$, $<1.1^{\circ}\text{C}$); una muestra solo posee sobreestimación de las precipitaciones y su temperatura ha sido bien estimada (ubicada a 4.050msnm, cuya variación es $7,2\text{mm}$ y $-2,9^{\circ}\text{C}$); las dos muestras restantes poseen una precipitación sobrestimada y una temperatura subestimada (ubicadas a 3.250 y 3.550msnm; cuya variación es $\bar{x}=6,4\text{mm}$, $>4,4\text{mm}$, $<7,4\text{mm}$ y $\bar{x}=-0.6^{\circ}\text{C}$, $>-0.3^{\circ}\text{C}$, $<-0,9^{\circ}\text{C}$) (**Tabla 2a**); de lo anterior se deduce que la subestimación de las precipitaciones y sobreestimación de temperaturas se produce principalmente en los sitios más elevados, la sobreestimación de las precipitaciones y subestimación de las temperaturas en muestras ubicadas en terrenos más bajos, en cambio la mayor correlación entre valores reales y estimados se asocia a muestras ubicadas en el centro del transecto. Estas alteraciones se encuentran directamente relacionadas con la concentración porcentual de cada tipo polínico al interior de las muestras y a que tales valores corresponden a un promedio de los valores reales asociados a cada uno de ellos, por lo que el valor final tiende a situarse en un punto medio del rango general de la tolerancia polínica.

6.1.2.3 Muestras con precipitación subestimada y temperatura sobreestimada.

La muestra ubicada a 4.051msnm (en el sector más elevado de Altos de Pica) es la que posee valores climáticos estimados ($87,7\text{mm} - 4,6^{\circ}\text{C}$) con mayor diferencia en relación a los observados ($96\text{mm} - 3,5^{\circ}\text{C}$), diferencia que se acentúa aún más en el caso de la temperatura. Esto se debe a que la muestra está compuesta, entre otros, por tipos polínicos indicadores de menores precipitaciones y mayores temperaturas (38% de *Senecio/Parastrephia*, 22% de *Baccharis*, 15% *Brassicaceae* tp. *Sysimbrium* y un escaso 7% de *Poaceae*), en condiciones geográficas que debieran estar dominadas por valores cercanos a un 40% de *Poaceae*.

La muestra ubicada a 3.850msnm posee una diferencia entre valores estimados ($85,8\text{mm} - 5^{\circ}\text{C}$) y observados ($90\text{mm} - 4,3^{\circ}\text{C}$) relativamente menor, aun así la escasa

concentración de Poaceae (2,2%) y gran predominancia de Fabaceae tp. *Adesmia* (38,8%, la mayor concentración de este tipo polínico en todo el registro) indicadora de condiciones ligeramente menos húmedas y más templadas influyen en que sus valores climáticos estimados cuenten con precipitaciones subestimadas y temperaturas sobreestimadas.

La muestra ubicada a 3.950msnm posee un error de predicción menor, ya que sus valores estimados (89,4mm – 4,3°C) y observados (93mm – 3,9°C) difieren muy poco; aun cuando el polen de la muestra está compuesto por gran cantidad de Poaceae (43,1%) y *Senecio/Parastrephia* (18,4%), la ligera variación entre valores estimados/observados es causada por una concentración de 35,6% de polen asociado a especies características de menores precipitaciones y mayores temperaturas (1,9% Fabaceae tp. *Adesmia*, 5,7% Chenopodiaceae, 7,9% Brassicaceae tp. *Draba* y 20,1% *Baccharis*).

La muestra ubicada a 3.150msnm es la que posee la menor variación entre sus datos estimados (62mm – 8°C) y observados (64mm – 7,8°C), la subestimación de sus precipitaciones y sobreestimación térmicas es causada por el predominio casi exclusivo de Chenopodiaceae (85,9%), representando condiciones más áridas que las observadas para esta muestra.

6.1.2.4 Muestras con precipitación sobreestimada y temperatura subestimada.

La muestra ubicada a 3.250msnm posee una variación de los valores estimados (73,4mm – 6,6°C) y observados (66mm – 7,5°C); aun cuando se compone principalmente con polen de Chenopodiaceae (52%), la ponderación de valores climáticos asociados a *Baccharis* (19%) y *Senecio/Parastrephia* (18%) influyen en una sobrerrepresentación de las precipitaciones y subestimación de las temperaturas.

Los valores climáticos estimados (85,4mm – 5°C) y observados (81mm – 5,7°C) de la muestra ubicada a 3.550 (asociada al sitio de colección de madrigueras fósiles) varían debido a la gran concentración de polen de Fabaceae tp. *Adesmia* (37%) y *Senecio/Parastrephia* (9%); sus valores climáticos asociados indican condiciones de

mayor humedad a las observadas en este sitio, y por tanto la estimación resultante presenta una sobrestimación de precipitación y subestimación térmica.

La muestra ubicada a 4.050msnm (al Sur del cerro Huilla, en el sector Este del transecto) posee una variación entre valores estimados (98,2mm – 3,2°C) y observados (91mm – 3,5°C) que se traduce principalmente en una sobreestimación de las precipitaciones, mientras las temperaturas presentan una gran correlación; esto se debe a la gran concentración de polen de Poaceae (46,1%) y Apiaceae (23%) acompañadas de tipos polínicos pobremente representados en el registro, cuyas mayores concentraciones se encuentran precisamente en esta muestra, alcanzando un 13,8% (4,6% Asteraceae tp Asteroidea, 4,6% Asteraceae tp. Cichoroidea y 4,6% Asteraceae tp. Ambrosia) y la ponderación de sus valores húmedos incrementa la sobrerrepresentación de las lluvias.

6.1.2.5 Confiabilidad de la representación climática actual

El reducido número de muestras actuales o set de entrenamiento (11 madrigueras actuales) restringe la asignación de variables climáticas para cada tipo polínico a un reducido número de sitios, problema especialmente agudo para aquellos tipos polínicos concentrados en una o pocas muestras, ya que la representación de su influencia climática estará muy influenciada por los sitios donde se concentran; además, la presencia/ausencia/dominancia de algún taxa en un sitio en particular podría estar asociada al predominio de condiciones locales que favorecen el desarrollo de especies más allá de sus límites habituales (sustrato, exposición, geomorfología, etc) (Tellier, 1998), incrementando la sobreestimación y/o subestimación de las variables dependiendo de la ubicación que estos tipos polínicos tengan al interior del gradiente climático (64-96mm y 3,5-7,8°C).

La ubicación de las muestras, cada 100mts de altitud, permite obtener una resolución de 5mm y 0,9°C de variación entre cada sitio de colecta, entregando un gran nivel de detalle al interior del gradiente; la mayor variación existente entre valores observados y estimados es considerablemente baja (\bar{x} =6,4mm, >4,4mm, <7,4mm y \bar{x} =0.6°C, >0.2°C, <1.1°C), por lo que aun cuando éstas se encuentren sub o sobrerrepresentadas siguen manteniendo una posición relativa prácticamente igual al interior del gradiente, representando una aproximación bastante certera de la realidad. Los trabajos Herzsuh et al (2009), Walker et al (1997) y Tonello et al (2010) poseen

valores residuales elevados a una escala mucho mayor, lo que reafirma la teoría de la escala en la sobre o sub estimación; además, el reducido número de muestras en el set de calibración impide la segregación de cualquiera de las muestras mencionadas, por lo que es necesario tener en cuenta este factor al momento de interpretar la reconstrucción (Luoto, 2012).

6.1.3 Confiabilidad de la reconstrucción climática

La variación altitudinal de los pisos de vegetación concluida a partir de cambios en la concentración polínica durante el período de tiempo cubierto por las madrigueras fósiles (~10.000 años A.P.) ha permitido realizar ciertas inferencias climáticas; según éstas, los mayores porcentajes de Poaceae indican momentos con gran incremento en las precipitaciones, que disminuyeron levemente hasta alcanzar valores similares a los actuales en presencia de mayores porcentajes de Fabaceae y Asteraceae-Asteroidea tipo *Baccharis* y tipo *Senecio/Parastrephia* y; condiciones de mayor aridez que en la actualidad se asocian a un incremento en el porcentaje de Chenopodiaceae (Maldonado y González, 2012).

Como el modelo de calibración polen-clima actual ha mostrado gran efectividad en la estimación de la temperatura media anual y las precipitaciones anuales en el gradiente altitudinal estudiado, los procesos vinculados a la función de transferencia han permitido reconstruir adecuadamente las condiciones paleoclimáticas en base a la variación de la concentración de polen fósil; estos resultados muestran gran concordancia con las estimaciones previamente realizadas por Maldonado y González (2012) ya que las variaciones climáticas reconstruidas se encuentran en directa relación con los cambios de porcentajes polínicos observados en las muestras de madriguera fósil, además esta reconstrucción climática ha permitido establecer también, a diferencia de trabajos previos, las relaciones existentes entre temperatura y concentración polínica; según estos: a) los mayores montos de precipitación y las bajas temperaturas reconstruidas ocurrieron asociados al predominio de polen de Poaceae; b) condiciones de precipitación y temperatura similares a la actualidad se presentaron cuando el registro polínico estuvo marcado por el predominio de Fabaceae y Asteraceae-Asteroidea tipo *Baccharis* y tipo *Senecio/Parastrephia* y, c) procesos más áridos que los actuales ocurrieron en períodos dominados por polen de Chenopodiaceae.

Como la estimación climática actual para los sitios ubicados sobre 3.900msnm posee una precipitación subestimada y temperatura sobreestimada y, los sitios ubicados bajo 3.650msnm tienen una precipitación sobreestimada y temperatura subestimada, se asume que los valores climáticos reconstruidos como momentos húmedos y fríos, o secos y cálidos son en realidad ligeramente más intensos; esta variación en la intensidad no posee, sin embargo, una oscilación mayor a los 8mm de precipitación y 1,2°C de temperatura.

Comparativamente hablando, en la actualidad el sitio ubicado a 3.700msnm posee 17 tipos polínicos, mientras que el sitio ubicado a 3.500msnm cuenta con 16 tipos polínicos; durante el transcurso del Holoceno, se evidencia la existencia de una sucesión taxonómica con un total de 33 tipos polínicos en el sitio ubicado a 3.700msnm y 20 tipos polínicos en el sitio ubicado a 3.500msnm. El delta existente entre los porcentajes de polen en ambos sitios, en la actualidad y durante el pasado, permite inferir la existencia de un incremento en la diversidad taxonómica en los sitios de mayor altitud, asociado a una mayor disponibilidad de agua; el gran incremento en el número de tipos polínicos observado en los registros fósiles se explica principalmente por la oscilación altitudinal de distintos pisos de vegetación a lo largo del tiempo y en segundo lugar por el incremento en la productividad biológica, en relación a la actualidad, en algunos momentos del rango temporal (~1.000, ~2.000 y ~10.000 años A.P.).

El incremento en la productividad biológica, además, se ve representando en la cantidad de madrigueras fósiles ubicadas en torno a 3.700msnm (21 muestras) en comparación con las halladas a 3.500msnm (11 muestras); esta simple pero interesante comparación permite reforzar la idea de una mayor contribución de las precipitaciones durante todo el Holoceno favoreciendo el desarrollo de la vida hacia los sitios más elevados incluso en los momentos más áridos del Holoceno Medio que se encuentra marcado por una ausencia de registros de madriguera fósil hacia 3.500msnm; además como la subsistencia de los roedores y por tanto la disponibilidad de registros se encuentra condicionada por la disponibilidad de alimentos (productividad biológica) (Nuñez et al., 2005) no sería posible establecer un reconstrucción climática adecuada en base a la información de un solo sitio ya que estos, de manera individual, representan los períodos húmedos con mayor precisión que los períodos secos.

La resolución temporal del registro durante los últimos ~650 años A.P. permite comparar la variación climática de ambos sitios con gran exactitud gracias a la existencia de fechados homólogos en torno a los ~60, ~100 y ~500 años A.P. (**Tabla 1** y **Figura 27**); al igual que en la actualidad, durante este período de tiempo se observa un mayor desarrollo de la vegetación en compañía del aumento de las precipitaciones, además la gran concordancia obtenida a partir del contraste con reconstrucciones previas de gran detalle (Morales et al., 2012) permitiría inferir las condiciones climáticas de un sitio extrapolando los resultados obtenidos en el otro de modo que, aun cuando entre ~650--~3.800 años A.P. no existen dataciones homologables entre las muestras de ambos sitios y que entre ~3.800--~10.000 años A.P. solo hay datos para el sitio ubicado a mayor altitud, es posible suplir el déficit de información y mejorar la resolución del registro en base a la variación climática unificada de ambos sitios (**Figura 31**).

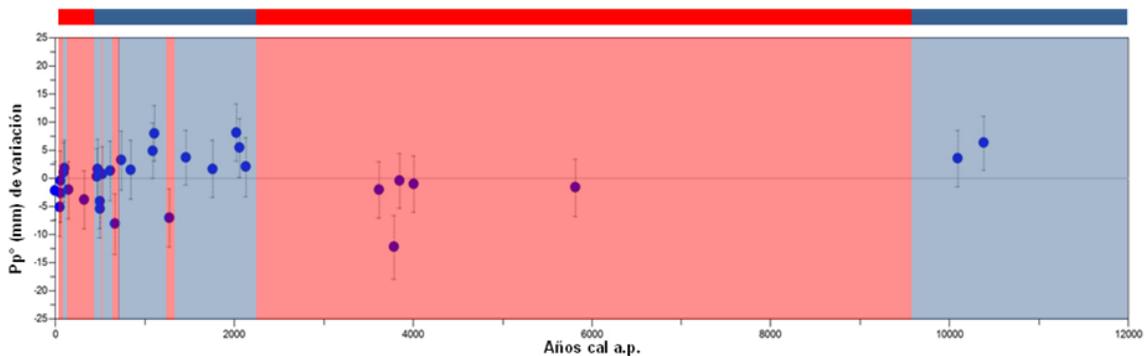


Figura 31: Reconstrucción climática conjunta en base a la variación de la precipitación obtenida en los sitios ubicados en torno a 3.500 y 3.700msnm; en rojo y azul se resaltan los períodos más secos y húmedos, respectivamente, en relación a la actualidad.

Como la tafonomía de las madrigueras fósiles se encuentra libre del “efecto reservorio” y existe una importante concentración de muestras datadas ha sido posible delimitar con gran precisión las variaciones climáticas ocurridas a lo largo del tiempo; además, la gran coherencia con estimaciones previas ha permitido inferir que las condiciones que permitieron el desarrollo de actividades humanas en el sector de Quebrada de Maní (Gayó et al., 2012) tiene directa relación con el incremento de lluvias en sectores altiplánicos; se ha podido entregar un marco hídrico-térmico consistente con la evolución de la vegetación en un transecto altitudinal (Maldonado y González, 2012) y se ha incrementado el nivel de detalle en la reconstrucción climática, principalmente para los últimos 2.500 años AP; con lo que se da por cumplido el objetivo principal de esta memoria.

Aun cuando, la variación espacial de los pisos de vegetación ha sido graficada para toda la zona de influencia del área de estudio (**Figura 28**, **Figura 29** y **Figura 30**), ésta presenta confiabilidad real solamente en los puntos de muestreo con madrigueras fósiles y su precisión disminuye progresivamente, en tasas no calculadas, a medida que nos alejamos de estos.

6.2 Conclusiones

Los registros de polen actual obtenidos a partir de madrigueras de roedor han demostrado la posibilidad de obtener una excelente representación de las condiciones climáticas actuales, y por tanto las estimaciones climáticas derivadas de la función de transferencia a partir de polen de madrigueras fósiles mantienen una calidad similar en la estimación del clima del pasado; sin embargo, para poder establecer una variación cartográfica espacial a lo largo del tiempo es necesario contar con datos actuales en un rango que abarque la variación climática en un gradiente altitudinal y, además, latitudinal mayor.

La gran relación existente con estimaciones climáticas previas revelan a) una relación cuantificable directa entre las variaciones en la concentración polínica y los cambios experimentados en la temperatura y precipitación del pasado, b) la gran precisión en la identificación de distintos momentos climáticos durante el pasado, c) la posibilidad de utilizar estos registros para corregir y/o precisar algunas dataciones de sedimentos de lagos Altiplánicos.

La reconstrucción climática realizada en esta memoria permite establecer una vinculación entre la evidencia de variación temporal de registros de ocupaciones humanas en sectores altiplánicos (Nuñez et al, 2005) y zonas de la Pampa del Tamarugal (Gayó et al, 2012), al menos durante el Holoceno; y que, una pequeña disminución de las precipitaciones cercana a 10mm (**Tabla 2** y **Figura 31**) tuvo grandes impactos en la ubicación de estos asentamientos. A este respecto es necesario destacar que al igual que en la actualidad, los “10mm de disminución” representan un punto medio de un rango temporal extenso en que la sumatoria de años húmedos y secos estuvo (según nuestros datos) caracterizada por un predominio de años secos, posiblemente asociado a un incremento en la intensidad de fenómenos ENOS y una disminución de las precipitaciones de verano, en que el paisaje altoandino habría estado marcado por condiciones de sequías incluso más intensas y prolongadas a las descritas por Bernhardson (1985) que causaron la muerte del ganado, redujeron la posibilidad de realizar labores agrícolas y dificultaron el desarrollo de las comunidades durante La Colonia.

La variación en la cubierta vegetal de la vertiente occidental del cordón Altos de Pica posiblemente generó grandes impactos en la capacidad de infiltración en favor de un incremento de la escorrentía superficial y posterior evaporación de los escasos montos de precipitación aportados en zonas altiplánicas en diferentes momentos del Holoceno, y por lo tanto una tasa de acumulación diferencial a lo largo del tiempo de las aguas del acuífero de la actual Pampa del Tamarugal, disminuyendo toda la productividad biológica en el transecto de estudio y sus áreas adyacentes lo que habría condicionado, al igual que en la actualidad, el desarrollo de las actividades humanas; favoreciendo la instauración de algunos asentamientos durante los momentos de mayor humedad y restringiendo la disponibilidad geográfica durante épocas de estiaje.

Los actuales grupos humanos presentes en el área de estudio, en cambio, poseen una dinámica de ocupación espacial mucho más compleja y, además de la disponibilidad de recursos e intereses naturales, su utilización del territorio se encuentra normada por el auge de la sociedad moderna que ejerce una constante y gran presión sobre el medio ambiente físico y social; no obstante lo anterior, los datos de esta memoria, solo pueden referirse a un proceso de cambio climático ocurrido de manera natural y en cuyo proceso no ha estado presente, en las magnitudes contemporáneas, la influencia de las actividades humanas.

Como se ha mencionado, durante el transcurso del Holoceno pequeñas variaciones climáticas causaron grandes impactos sobre todo el territorio Altiplánico; por lo que una mínima variación climática tendrá importantes consecuencias en sectores andinos y áreas adyacentes durante el futuro, siendo necesaria la implementación de una política nacional que asegure la correcta gestión del territorio altiplánico y el uso y goce que se tiene de sus aguas ya que, así como en el pasado, una disminución constante en el tiempo de las precipitaciones, hacia el futuro, tendrá un gran impacto sobre los recursos hídricos disponibles para el consumo humano, limitando aún más el desarrollo de la vida y la sociedad en zonas áridas.

Las madrigueras actuales han demostrado gran efectividad en la utilización de sus registros polínicos como fuente de información primaria para la implementación de funciones de transferencia, con lo que se ha podido comprobar la veracidad de la hipótesis planteada, ya que las variaciones en los porcentajes de polen fósil han permitido reconstruir adecuadamente las oscilaciones climáticas entre períodos más

fríos-húmedos y cálidos-secos ocurridos durante el pasado; reforzando, a través del polen, la primacía de la vegetación como indicador de las condiciones ambientales y fuente de información debido a su vinculación con el desarrollo de la vida en todas sus escalas, por lo que resulta ser un herramienta que permite ser el punto de partida para la interpretación de una gran cantidad de análisis y cuya importancia ha estado presente durante todo el desarrollo de la vida humana en planeta, posibilitando por ejemplo el establecimiento del hombre a través de la instauración de la agricultura.

Por último, la presente memoria ha demostrado la eficacia en la utilización de registros de paleomadrigueras como *poxy* en la reconstrucción de ambientes del pasado y constituye el primer paso en el proceso de reconstrucciones climáticas cuantitativas en las zonas áridas del país, resultando ser un gran aporte en la comprensión de los procesos involucrados en las actuales condiciones de aridez del norte de Chile y es un documento pionero en la utilización de nuevas metodologías que permitirán con su desarrollo mejorar la comprensión del medioambiente y avanzar hacia retroalimentación constante de los actuales instrumentos de planificación y gestión de los recursos.

7. Anexos

7.1 Descripción general de las principales especies descritas para el área de estudio

Aizoaceae

- *Tetragonia microcarpa*: Hierba anual de lluvia abundante en el piso desértico y piso prepuneño, entre 2500 y 3200msnm (Villagrán et al, 2003)

Apiaceae

- *Azorella compacta*: Cojín altoandino de hasta 1m de altura, de color verde claro, duros, compactos, con presencia frecuente de resina (Riedemann et al, 2008); crece en hábitats rocosos, por sobre 4.000msnm (Villagrán et al, 2003)

Asteraceae

- *Baccharis boliviensis*: Arbusto siempreverde, aromático, muy ramoso, de hasta 1,5m de altura (Riedemann et al, 2008) característico de los tolares, entre 3.200 y 3.800msnm (Villagrán et al, 2003).
- *Baccharis tola* (Asteraceae): Arbusto siempreverde de 60-100cm de altura, ramas desnudas en la parte inferior (Riedemann et al, 2008), resinoso, característico en laderas de exposición Norte de la transición entre tolares y pajonales. Muy parecido a *B. santelices* (Villagrán et al, 2003; Tellier, 1999)
- *Baccharis santelices*: Arbusto siempreverde de hasta 1m de altura, ramas desnudas en la parte inferior (Riedemann et al, 2008), resinoso, característico en laderas de exposición Norte de la transición entre tolares y pajonales. Muy parecido a *B. tola*, de la que se distingue por sus hojas enteras. (Villagrán et al, 2003; Tellier, 1999)
- *Chersodoma candida*: Arbusto de hasta 70cm de altura, hojas glabras, dentadas a enteras (sólo las superiores). Forma parte de los tolares, frecuente en formaciones ignimbríticas entre 3.800 y 4.200msnm (Tellier, 1999)
- *Chuquiraga atacamensis*: Arbusto pequeño ramoso, intrincado, siempreverde (Riedemann et al, 2008), característico de los tolares hacia Collaguasi, entre 3.600 y 3.800msnm (Villagrán et al, 2003).
- *Parastrephia lepidophylla*: Arbusto de hasta 1,5m de altura; ramillas delgadas, de 1-1,5mm de diámetro. Prefiere sitios arenosos del piso andino (Riedemann et al, 2008)

- *Parastrephia lucida*: Arbustos resinosos de hasta 1,7m de altura, tallos glabros, glandulosos o tomentosos, resinosos bien ramificados, prefiere los fondos de quebradas (Riedemann et al, 2008), en hábitats rocosos y/o húmedos ubicados en la transición entre los tolares y pajonales (Villagrán et al, 2003)
- *Parastrephia quadrangularis*: Arbusto de hasta 30cm de altura. Tallos, incluyendo las hojas, de 2-2,5mm de diámetro. Crece en laderas y mesetas de los pisos andino y altoandino (Riedemann et al, 2008)
- *Senecio nutans*: Arbustos bajos de hasta 80cm de altura, ramoso, glanduloso, con aroma muy fuerte. Cabezuelas solitarias, flores marginales ausentes; crece en el piso andino (Riedemann et al, 2008)
- *Senecio puchii*: Subarbusto de hasta 15cm, ramas viejas con los restos de las hojas secas, tallos nuevos densamente hojosos (Tellier, 1999); crece formando cojines en hábitats arenosos del piso altoandino, por sobre 4.000msnm. (Villagrán et al, 2003)
- *Tagetes multiflora*: Hierba anual, tallo muy ramoso, de hasta 20cm de altura (Riedemann et al, 2008); crece principalmente en el tolar cuando llueve (Villagrán et al, 2003).
- *Trichocline desertícola*: Hierba perenne, provista con rizomas, a partir de los cuales emergen, sobre tallos lanosos, las hojas dispuestas en rosetas (Tellier, 1999). Prefiere suelos arenoso pedregosos, en ambientes tipo “pampas”, muy secos y expuestos al viento del piso andino entre 3.700 y 3.900msnm (Riedemann et al, 2008)

Boraginaceae

- *Cryptantha parvifolia*: Hierbas anuales o perennes. Tallos cubiertos de pelos asperos y densos, lo que a muchas especies del género les confiere un color plateado o brillante. Se encuentra en laderas de poca pendiente (Riedemann et al, 2008) Pasto de lluvia abundante en el jaral desértico y piso prepuneño, entre 2500 y 3200msnm (Villagrán et al, 2003)
- *Phacelia setigera*: Hierba perenne, piloso-glandulosa, con mal olor, pegajosa (Riedemann et al, 2008), con hojas en roseta; esta variedad poco frecuente en Chile, crece en sitios alterados (Tellier, 199)
- *Tiquilia atacamensis*: Planta abundante en el jaral desértico y piso prepuneño, entre 2.500 y 3.200 (Villagrán et al, 2003)

Brassicaceae

- *Descurainia*: Pasto de lluvia abundante en el jaral desértico y piso prepuneño, entre 2.500 y 3.200msnm (Villagrán et al, 2003).
- *Sisymbrium lanatum*: Pastito de temporal o de lluvia, abundante en el jaral desértico y piso prepuneño, entre 2.500 y 3.200msnm. (Villagrán et al, 2003)

Cactaceae

- *Opuntia Camachoi*: Plantas bajas, provistas de raíces tuberosas. Forman cojines densos con diferentes tamaños y formas. Tallos articulados, esféricos con espinas frecuentemente aplanadas; crece en el piso subandino y andino (Riedemann et al, 2008)
- *Opuntia ignescens*: Cactácea articulada, de hasta 40 cm, crece formando cojines densos en el piso altoandino (Tellier, 1999)

Caesalpineaceae

- *Caesalpinia aphylla*: Arbusto característico del Desierto de Atacama, abundante a la salida de Pozo Almonte, alrededor de 1.000msnm. (Villagrán et al, 2003)

Calceolariaceae

- *Calceolaria stellariifolia*: Subarbusto de hasta 15cm de altura, tallos delgados, frágiles; sus flores amarillas parecen zapatitos con tres dedos. Crece en el piso altoandino, en hábitats rocosos y húmedos, frecuentemente bajo peñas (Villagrán et al, 2003; Riedemann et al, 2008)

Calyceraceae

- *Moschopsis monocephala*: Hierba perenne, hojas radicales en roseta (Riedemann et al, 2008) crece de forma escasa en hábitats rocosos del piso altoandino, por sobre 4.000msnm (Villagrán et al, 2003)

Caryophyllaceae

- *Pycnophyllum bryoides*: Hierbas agrupadas densamente en forma de céspedes convexos, abultados, de color verde glauco (Riedemann et al, 2008); crece en hábitats rocosos y pampas altoandinas, en sitios algo más húmedos, por sobre 4.000msnm (Villagrán et al, 2003).

- *Pycnophyllum macropetalum*: Hierba perenne, forma cojines apretados, planos más o menos del color suelo o negruzcos (Riedemann et al, 2008). Ramillas muy cortas, cilíndricas con los extremos dilatados. Crece en el límite de la vegetación, en laderas de exposición Sur, en sitios muy expuestos al viento entre 4.500 y 4.700 msnm (Tellier, 1999)
- *Pycnophyllum molle*: Planta glabra, de 5-10cm de altura, agrupadas densamente en cojines sueltos casi planos (Riedemann et al, 2008); crece en hábitats rocosos y pampas altoandinas, por sobre 4.000msnm (Villagrán et al, 2003).

Chenopodiaceae

- *Atriplex sp.*: Arbusto erguido de 30-60cm de altura. Hojas gris-amarillentas; frecuente y abundante en laderas y quebradas (Riedemann et al, 2008) Arbusto abundante en el jaral desértico y piso prepuneño, entre 2.500 y 3.200msnm (Villagrán et al, 2003).

Fabaceae

- *Adesmia melanthes*: Arbusto espinoso de 70-170cm de altura, ramas gruesas, café-rojizo, espinas bifurcadas, tallos jóvenes resinosos, de color, hojas muy pequeñas; crece en las quebradas del tolar (Arroyo et al, 1998; Riedemann et al, 2008, Tellier, 1999)
- *Adesmia spinosissima*: Pequeño arbusto espinoso-ramoso, ramas pubescentes, de hasta 1,2m de altura, flores amarillas (Riedemann et al, 2008) característico de los tolares y pajonales, entre 3.200 y 4.000msnm. (Villagrán et al, 2003)
- *Adesmia aff. subterranea*: Arbusto en placa, leñoso, apretado, espinas escondidas entre las hojas; es habitual en el piso altoandino (Riedemann et al, 2008)
- *Astragalus cryptanthus*: Hierba perenne de hasta 25cm, flores azules, crece formando rosetas en terrenos arenosos ubicados entre 4.000 y 4.150msnm (Villagrán et al, 2003; Riedemann et al, 2008)

Malvaceae

- *Cristaria dissecta*: Hierba perenne de hasta 40cm de altura. Hojas oval-lanceoladas cubiertas de pelos estrellados, márgenes dentados, base atenuada, ápice agudo, pecioladas y de color verde amarillento. Prefiere las planicies desnudas (Riedemann et al, 2008). Pasto de lluvia abundante en el jaral desértico y piso prepuneño, entre 2.500 y 3.200msnm (Villagrán et al, 2003)
- *Tarasa operculata*: Subarbusto pubescente, de color ceniza. Hojas triangular-lanceoladas, a veces sub-hastadas, de base truncada, ápice agudo, márgenes lobulados y cubiertas de pelos. (Riedemann et al, 2008). Pasto de lluvia abundante en el jaral desértico y piso prepuneño, entre 2.500 y 3.200msnm (Villagrán et al, 2003)
- *Nototriche auricoma*: Hierba perenne, pulvinada, de 15 mm. Flores blancas o amarillas de cca. 1 cm. Poco frecuente, siempre en laderas situadas a gran altitud, entre 4.550 y 4.700msnm (Tellier, 1999)

Solanaceae/Nolaceae

- *Nolana tarapacana*: Pasto de lluvia abundante en el jaral desértico y piso prepuneño, entre 2.500 y 3.200msnm (Villagrán et al, 2003)
- *Fabiana ramulosa*: Arbustito de hasta 1,5m de altura, erecto y ramoso, con hojas imbricadas densas concentradas hacia el extremo de las ramas; con flores amarillas en el extremo de las pequeñas ramillas laterales (Riedemann et al, 2008); característico de los tolares, entre 3.200 y 3.800msnm (Villagrán et al., 2003).
- *Fabiana squamata*: Pequeño arbusto de hasta 30cm de altura, erecto y ramoso, ramas cubiertas completamente con hojas imbricadas densas concentradas hacia los extremos de las ramas, alternas, lineares y glandulosas; flores terminales de color amarillo-verdoso (Riedemann et al., 2008) característico de los tolares cercanos a la transición con los pajonales altoandinos, alrededor de 3.800msnm (Villagrán et al., 2003).
- *Fabiana denudata*: Arbusto de hasta 1,5m de altura, ramoso con ramas delgadas y erectas, de tallos prismáticos y pegajosos (Riedemann et al., 2008), característico de los tolares, entre 3.200 y 3.800 msnm (Villagrán et al., 2003).

Poaceae

- *Anatherostipa venusta*: Hierba perenne que crece formando champas con cañas floríferas de hasta 35cm; prefiere los suelos con roca expuesta y es una de las pajas más abundantes del piso altoandino, entre 3.800 y 4.150msnm (Teillier, 1999; Villagrán et al., 2003).
- *Deyeuxia crispa*: Hierba perenne en champas de 10-15cm de altura, espiguillas con una flor, con un vilano de pelos en la base; crece en sitios áridos muy expuestos al viento (Teillier, 1999; Riedemann et al., 2008).
- *Festuca chrysophylla*: Hierba perenne, crece en champas de hasta 1 m de diámetro, a menudo en forma de semicírculos (Teillier, 1999). De hojas generalmente duras y punzantes (Riedemann et al., 2008), es una de las pajas más abundantes del piso altoandino, entre 3.800 y 4.150msnm (Villagrán et al., 2003).
- *Nassella nardoides* ó *Stipa nardoides*: Hierba cespitosa de 8-10cm de alto (Kielsing, 2009); es una de las pajas más abundantes del piso altoandino, entre 3.800 y 4.150msnm (Villagrán et al., 2003; Riedemann et al., 2008).
- *Stipa chrysophylla*: Hierba perenne con hojas de color amarillo, erectas de hasta 45cm (Arroyo et al., 1998); es una de las pajas más abundantes del piso altoandino, entre 3.800 y 4.150msnm (Villagrán et al., 2003)(Villagrán et al., 2003), llegando a ser dominante en todo el piso altoandino desde el Norte Chico hasta la Zona Central (Riedemann et al., 2008).
- *Stipa frígida*: Hierba perenne cespitosa en champas. Cañas floríferas de hasta 25 cm. Frecuente en sitios sobre 4.500msnm (Teillier, 1999).
- *Stipa pogonathera*: Especie de las montañas bajas de Chile central, sus inflorescencias se caracterizan por las larguísimas aristas plumosas. El género *Stipa* se encuentra en laderas y mesetas áridas, frecuentemente expuestas al viento (Riedemann et al., 2008).

Portulacaceae

- *Cistanthe*: Hierbas perennes provistas con rizomas. Hojas suculentas, glabras, alternas, simples, enteras. Inflorescencia una cima unilateral, simple o doble, a veces contraída, con dos brácteas con manchas oscuras en el dorso. Corola con 5-10 estambres. Fruto, una capsula. Prefiere los pedregales sueltos ("acarreos") de los pisos subandinos y andinos (Riedemann et al., 2008).

Rosaceae

- *P. tarapacana*: Árbol de 3-7m de altura por 30-50cm de diámetro de tronco, corteza membranosa que se desprende en laminas muy finas, ramas frecuentemente retorcidas; prefiere los sitios rocosos de los pisos andino y altoandino (Riedemann et al., 2008).

Verbenaceae

- *Junellia tridactyla*: Subarbusto en cojín, casi totalmente enterrado, tallos aéreos de hasta 2 cm. Flores rojas, tubulosas, de hasta 4 mm. Crece frecuentemente en el piso andino entre 4400 y 4650 msnm (Teillier, 1999).
- *Junellia seriphioides*: Arbusto erguido con crecimiento en placas, de 50-80cm de altura. Crece en el piso andino (Riedemann et al., 2008).
- *Lampaya medicinalis*: Arbusto ramoso, glabro, tallos de corteza rojiza (Riedemann et al., 2008) característico de los tolares cercanos a la transición con los pajonales altoandinos, alrededor del Salar de Coposa, cerca de los 3.700msnm (Villagrán et al., 2003)

7.2 Principales tipos polínicos identificados

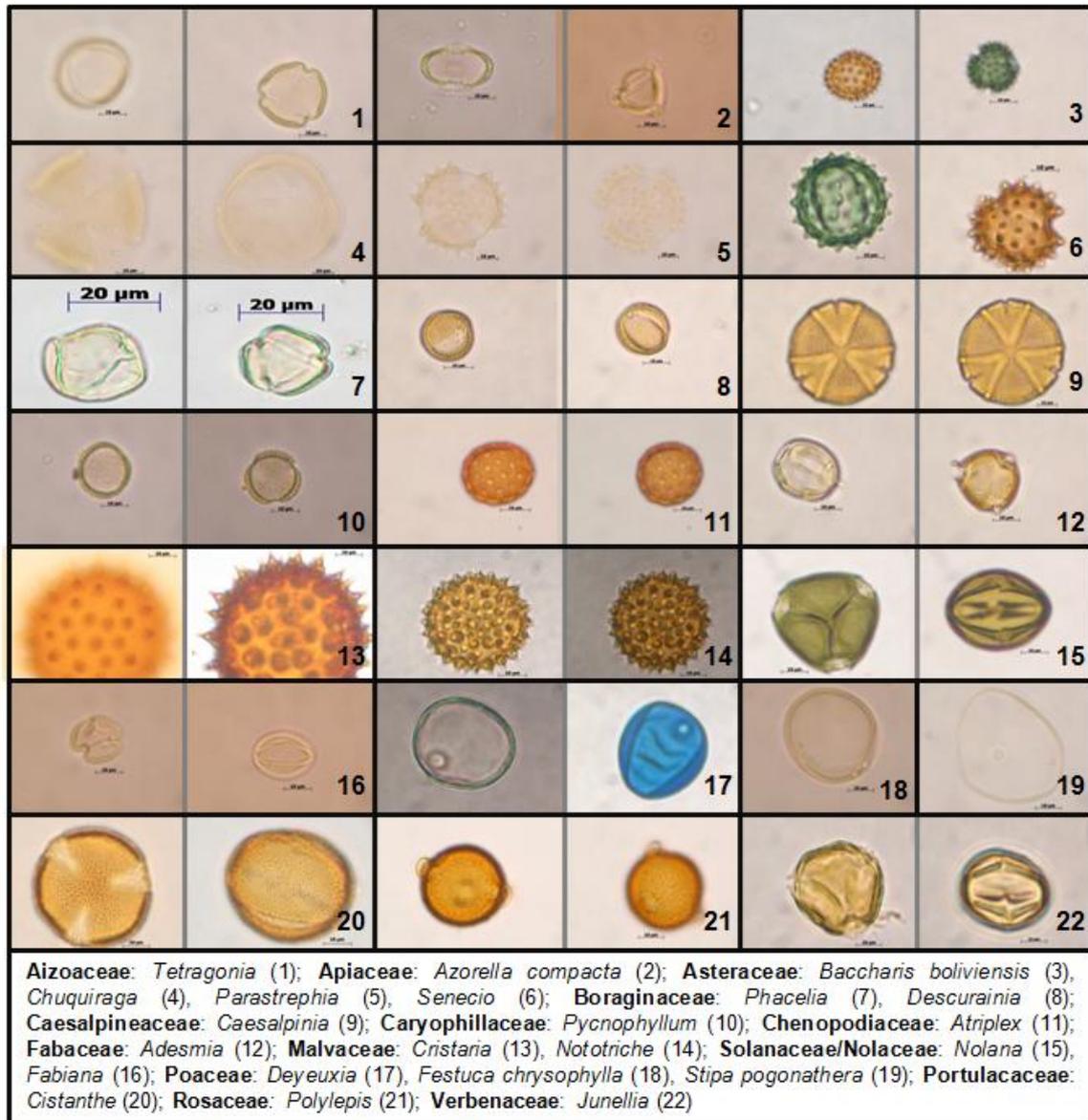


Figura 32: Fotografía de los principales tipos polínicos identificados en las madrigueras actuales. (Fuente: Palinoteca Laboratorio de Paleoambientes CEAZA)

Bibliografía

- Aceituno, P. El fenómeno El Niño 1997-1998. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*. 27(3):443-448, 1998
- Acosta, O. y E. Custodio. Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (Norte de Chile). *Boletín Geológico y Minero*. 119(1): 33-50, 2008.
- Agashe, S. N. y E. Caulton. *Pollen and spores: applications with special emphasis on aerobiology and allergy*. Enfield, NH: Science Publishers, 2009.
- Allmendinger, R. W., T. E. Jordan, S. M. Kay y L. Isacks. The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the central Andes. *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 25: 139-174, 1997.
- Arroyo, M. T. K., C. Castor, C. Marticorena, M. Muñoz, L. Cavieres, O. Matthei, F. A. Squeo, M. Gosjean y R. Rodríguez. The flora of Lullailaco national park located in the transitional winter-summer rainfall area of the northern Chilean Andes. *Gayana botánica*. 55: 93-110, 1998.
- Bartlein, P. J., S. P. Harrison, S. Brewer, S. Connor, B. A. S. Davis, K. Gajewski, J. Guiot, T. I. Harrison-Prentice, A. Henderson, O. Peyron, I. C. Prentice, M. Scholze, H. Seppa, B. Shuman, S. Sugita, R. S. Thompson, A. E. Viau, J. Williams y H. B. Wu. Pollen-based continental climate reconstructions at 6 and 21 ka: a global synthesis. *Climate Dynamics*. 37(3-4): 775-802, 2011.
- Becerra, P. y L. Faúndez. Vegetación del desierto interior de Quillagua, II Región de Antofagasta, Chile. *Chloris Chilensis*. 4(2): 2001.
- Bernhardson, W. El desarrollo de recursos hidrológicos del altiplano ariqueño y su impacto sobre la economía ganadera de la zona. *Revista Chungará*. 14:169-181. 1985
- Betancourt, J. L., C. Latorre, J. A. Rech, J. Quade y K. A. Rylander. A 22,000-Year Record of Monsoonal Precipitation from Northern Chile's Atacama Desert. *Science*. 289(5484): 1542-1546, 2000.

Betancourt, J. L. y B. Saavedra. Nuevo método paleoecológico para el estudio de zonas áridas en Sudamérica: paleomadrigueras de roedores (New paleoecological method for Quaternary studies in arid lands of South America: Rodent middens). *Revista Chilena de Historia Natatural*. 75: 527-546, 2002.

Birks, H. J. B. Quantitative paleoenvironmental reconstructions. EN: D. Maddy and J. S. Brew, *"Statistical modeling quaternary science data, Technical Guide 5."*. Cambridge, Quaternary Research Association, 1995. 161-254.

Birks, H. J. B., O. Heiri, H. Seppä y A. E. Bjune. Strengths and weaknesses of quantitative climate reconstructions based on late-Quaternary biological proxies. *Open Ecological Journal*. 3: 68-110, 2010.

Booth, R. K. y S. T. Jackson. Paleoecology of the a northern Michigan Lake and the relationship among climate, vegetation, and Great Lakes water levels. *Quaternary Research*. 57: 120-130, 2002.

Bradley, R. S. *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary*. San Diego, Elsevier, Acedemic Press., 1999.

Cavieres, L., M. Mihoc, A. marticorena, O. Matthei y F. A. Squeo. Determinación de áreas prioritarias de conservación: análisis de parsimonia de endemismos (PAE) en la flora de la IV Región de Coquimbo. EN: F. A. Squeo, G. Arancio and J. R. Gutiérrez, *"Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo"*. La Serena, Chile, Ediciones Universidad de La Serena, 2001. 159-170.

CED. Plan de gestión para la conservación de la biodiversidad del Salar del Huasco 2004-2010. Centro de Estudios para el Desarrollo (CED), 2005.

Cortés, A., J. R. Rau, E. Miranda y J. E. Jiménez. Hábitos alimenticios de *Lagidium viscacia* y *Abrocoma cinerea*: roedores sintópicos en ambientes altoandinos del norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natatural*. 75: 583-593, 2002.

Corvalán, J. Geología. EN: E. Pisano, *"Geografía de económica de Chile"*. Santiago, CORFO, 1965. 228-267.

Chase, B.M., Scott, L., Meadows, M.E., Gil-Romera, G., Boom, A., Carr, A.S., Reimer, P.J., Truc, L., Valsecchi, V., Quick, L.J.. Rock hyrax middens: a palaeoenvironmental archive for southern African drylands. *Quaternary Science Reviews* 56, 107-125. 2012

Cheddadi, R. y A. Bar-Hen. Spatial gradient of temperature and potential vegetation feedback across Europe during the late Quaternary. *Climate Dynamics*. 32: 371-379, 2009.

Cheddadi, R., J. L. de Beaulieu, J. Jouzel, V. Andrieu-Ponel, J. M. Laurent, M. Reille, D. Raynaud y A. Bar-Hem. Similarity of vegetation dynamics during interglacial periods. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 12(39): 13939-13943, 2005.

Cheddadi, R., H. F. Lamb, J. Guiot y S. van der Kaars. Holocene climatic change in Morocco: a quantitative reconstruction from pollen data. *Climate Dynamics*. 14: 883-890, 1998.

Davis, B. A. S., S. Brewer, A. C. Stevenson y J. Guiot. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews*. 22: 1701-1716, 2003.

Davis, O. K. y R. S. Anderson. Pollen in packrat (*Neotoma*) middens: pollen transport and the relationship of pollen to vegetation. *Palynology*. 11: 185-198, 1987.

De Porras, M. E., L. González y A. Maldonado. Modern pollen-vegetation-climate data set based on surface and rodent midden samples from the Atacama Desert (Chile) and its potential application to Late Quaternary reconstructions. XXVIII INQUA Congress, Berna (Suiza). 2011.

de Renzi, M., J. Martinell y S. Reguant. Bioestratigrafía, tafonomía y paleoecología. *Acta geológica hispánica*. 10(2): 80-86, 1975.

DGA. Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca quebrada de Tarapacá. Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. 84, 2004.

DGA. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV,I,II y III. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile 349, 2009.

DGA. Actualización de la oferta y la demanda de recursos hídricos subterráneos del sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pampa del Tamarugal. Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. 46, 2011.

Di Castri, F. y E. Hajek. Bioclimatología de Chile. Santiago, Vicerrectoría académica, Universidad Católica de Chile, 1976.

Elias, S.A. Plant macrofossil methods and studies | rodent middens. In: Encyclopedia of Quaternary Science. Elsevier, B.V., pp. 2356-2367. Royal Holloway, University of London, Surrey, UK. 2007.

Fægri, K. y J. Iversen. Textbook of pollen analysis. Londres, John Wiley & Sons Ltd., 1989. 327.

Fisher J., K.L. Cole, R.S. Anderson. Using packrat middens to assess grazing effects on vegetation change. Journal of Arid Environments 73:937–948. 2009

Fletcher, M.-S. y I. Thomas. A quantitative Late Quaternary temperature reconstruction from western Tasmania, Australia. Quaternary Science Reviews. 29: 2351-2361, 2010.

Foley, J. A., S. Levis, I. C. Prentice, D. Pollard y S. L. Thompson. Coupling dynamic models of climate and vegetation. Global Change Biology. 4: 561-579, 1998.

Francou, B. y Pizarro, L. El Niño y la sequía en los altos Andes Centrales (Perú y Bolivia). Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines. XIV, No. 1-2, pp.1-18. 1985

Fréchette, B., A. de Vernal, J. Guiot, A. P. Wolfe, G. H. Miller, B. Fredskild, M. W. Kerwin y P. J. H. Richard. Methodological basis for quantitative reconstruction of air temperature and sunshine from pollen assemblages in Arctic Canada and Greenland. Quaternary Science Reviews. 27: 1197-1216, 2008.

Gajardo, R. La Vegetación Natural de Chile. Clasificación y Distribución Geográfica. Santiago, Chile, Editorial Universitaria, 1994.

García, M., D. Raes y S. E. Jacobsen. Reference evapotranspiration and crop coefficient of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) in the Bolivian Altiplano. Agricultural Water Management. 60: 119-134, 2003.

Garreaud, R. D. The Andes climate and weather. Adv. Geosci. 22: 3-11, 2009.

Garreaud, R. D., M. Vuille y A. C. Clement. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology. 194: 5-22, 2003.

Garreaud, R. D., M. Vuille, R. Compagnucci y J. Marengo. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 281(3-4): 180-195, 2009.

Gayó, E. M., C. Latorre, C. M. Santoro, A. Maldonado y R. de Pol-Holz. Hydroclimate variability in the low-elevation Atacama deserto over the last 2500 yr. *Climate of the Past*. 8: 287-306, 2012.

Geyh, M. A., M. Grosjean, L. Nuñez y U. Schotterer. Radiocarbon reservoir effect and the timing of the Late-Glacial/Early Holocene humid phase in the Atacama desert (northern Chile). *Quaternary Research*. 52: 143-153, 1999.

Giralt, S., A. Moreno, R. Bao, A. Sáez, R. Prego, B. L. Valero-Garcés, J. J. Pueyo, P. González-Sampériz y C. Taberner. A statistical approach to disentangle environmental forcings in a lacustrine record: the Lago Chungará case (Chilean Altiplano). *Journal of Paleolimnology* 40: 195-215, 2008.

González, L. y A. Maldonado. Análisis palinológico de muestras del transecto Salar del Huasco - Pozo Almonte y Transecto Salar de El Laco - Salar de Atacama. Informe de avance Proyecto FONDECYT#1080458. 2010.

XIII Congreso de ingeniería sanitaria y ambiental AIDIS (1999). Origen de las aguas subterráneas del sector Pica-Salar del Huasco, provincia de Iquique, I Región de Tarapacá. Chile,

Grosjean, M. Mid-Holocene climate in the south-central Andes: Humid or dry? *Science*. 292: 2391-2392, 2001.

Grosjean, M., I. Cartajena, M. A. Geyh y L. Nuñez. From proxy data to paleoclimate interpretation: the mid-Holocene paradox of the Atacama Desert, northern Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 194(1-3): 247-258, 2003.

Grosjean, M., B. Messerli, C. Ammann, M. A. Geyh, K. Graf, B. Jenny, K. Kammer, L. Nuñez, H. Schreier, U. Schotterer, A. Schwalb, B. Valero-Garcés y M. Vuille. Holocene environmental changes in the Atacama altiplano and paleoclimatic implications. *Bulletin de l'Institut français d'études Andines*. 24(3): 585-594, 1995.

Grosjean, M. y L. Nuñez. Lateglacial, early and middle Holocene environments, human occupation, and resource use in the Atacama (Northern Chile). *Geoarchaeology*. 9: 271-286, 1994.

Grosjean, M., J. Van Leeuwen, W. O. Van der Knaap, M. A. Geyh, B. Ammann, W. Tanner, B. Messerli, L. Nuñez, B. Valero-Garcés y H. Veit. A 22,000 ¹⁴C year BP sediment and pollen record of climate change from Laguna Miscanti (23°S) , northern Chile. *Global and Planetary Change*. 28: 35-51, 2001.

Guerrero, V. Salar de Huasco: en busca del agua perdida. *revista de Ciencias Sociales*. 4: 38-54, 1994.

Hernández-Sampieri, R., C. Fernández-Collado y P. Baptista-Lucio. *Metodología de la investigación*. Mexico, McGraw Hill., 2006.

Herzschuh, U., H. J. B. Birks, X. Q. Liu, C. Kubatzki y G. Lohmann. What caused the mid-Holocene forest decline on the eastern Tibet-Qinghai Plateau? . *Global Ecology and Biogeography*. 19: 278-286, 2009.

Heusser, C. J. *Pollen and spores of Chile: Modern types of the Pteridophyta, Gymnospermae, and Angiospermae*. Tucson, University of Arizona Press 1971.

Heusser, C. J. y S. S. Streeter. A temperature and precipitation record of the past 16000 years in Southern Chile. *Science*. 210: 1345-1347, 1980.

Heusser, C. J., S. S. Streeter y M. Stuiver. Temperature and precipitation record in Southern Chile extended to ~43000 yr. ago. *Nature*. 294: 65-67, 1981.

Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones y A. Jarvis. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 25: 1965-1978, 2005.

Horton, B. P., Y. Zong, C. Hillier y S. Engelhart. Diatoms from Indonesian mangroves and their suitability as sea-level indicators for tropical environments. *Marine Micropaleontology*. 63: 155-168, 2007.

Houston, J. Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*. 26: 2181-2198, 2006.

Houston, J. y A. J. Hartley. The central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the Atacama Desert. *International Journal of Climatology*. 23(12): 1453-1464, 2003.

Huang, K., Z. Zheng y R. Cheddadi. Atlas of plants distributions and related climate in China. China, National Natural Science Foundation of China, 2008.

Huang, K., Z. Zheng, L. François, D. Guan y R. Cheddadi. Plants bioclimatic affinity groups in China: Observed vs. simulated ranges. *The Open Ecology Journal*. 3(1): 24-42, 2010.

INE. Resultados preliminares Censo de Población y Vivienda 2012. Instituto Nacional de Estadísticas, Gobierno de Chile. 2012.

IPCC. Summary for Policymakers. EN: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, et al, "*Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Intergovernmental Panel on Climate Change*". Cambridge, United Kingdom and New York, USA, Cambridge University Press, 2007.

Islebe, G. La paleoecología: Bases y su aplicación. Foresta Veracruzana, Universidad Veracruzana, Xalapa, México. 1(2): 47-50, 1999.

Jaksic, F. M., P. A. Marquet y H. González. Una perspectiva ecológica sobre el uso del agua en el Norte Grande: La región de Tarapacá como estudio de caso. *Estudios Públicos*. 68: 1997.

Jiang, W. Y., J. Guiot, G. O. Chu, H. B. Wu, B. Y. Yuan, C. Hatté y Z. T. Guo. An improved methodology of the modern analogues technique for palaeoclimate reconstruction in arid and semi-arid regions. *Boreas*. 39: 145-153, 2010.

Juggins, S. C2 Version 1.5 user guide. Software for ecological and paleoecological data analysis and visualisation. Newcastle upon Tyne: Newcastle University, 2007

Juggins, S. y H. J. B. Birks. Quantitative environmental reconstructions from biological data. EN: H. J. B. Birks, A. F. Lotter, S. Juggins and J. P. Smol, "*Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Volume 5: Data Handling and Numerical Techniques*". Dordrecht, Springer, 2012. 431-494.

Kielsing, R. Flora de San Juan (Volumen I, Pteridofitas, Gimnospermas, Dicotiledoneas Dialipétalas). Buenos aires, Vazquez Mazzini Editores, 2009.

Kuentz, A. Dynamiques actuelle et holocène de la Puna (Andes sèches du Pérou) à partir des observations de terrain, de la cartographie (SIG) et de la palynologie (Région du Nevado Coropuna). Clermont-Ferrand, Université de soutenance - Université Blaise Pascal 2009.

Lagos, N. *Abrocoma cinerea*. [fotografía] [en línea] En: <http://www.fotonaturaleza.cl/data/media/2/IMG_0162.jpg> [consulta 26 septiembre 2013]

Latorre, C. Clima y vegetación del Desierto de Atacama durante el Cuaternario tardío, II Región, Chile. PhD Thesis. Santiago. Universidad de Chile, 2002.

Latorre, C. Fluctuaciones climáticas cuaternarias y sus impactos sobre la biodiversidad de Chile. EN: P. Saball, M. T. K. Arroyo, J. C. Castilla, C. Estades, et al, "*Biodiversidad de Chile. Patrimonio y Desafíos*". Santiago, Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2006. 60-67.

Latorre, C., J. L. Betancourt, J. A. Rech, J. Quade, C. Holmgren, C. Placzek, A. Maldonado, M. Vuille y K. A. Rylander. Late Quaternary history of the Atacama Desert. EN: M. Smith and P. Hesse, "*23° S. The Archaeology and Environmental History of the Southern Deserts*". Canberra, National Museum of Australia Press, 2005. 73-90.

Latorre, C., J. L. R. Betancourt, K.A., J. Quade y O. Metthei. A vegetation history from the arid prepuna of northern Chile (22–23° S) over the last 13.500 years. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 194: 223-246, 2003.

Laurent, J. M., A. Bar-Hem, L. François, M. Ghislain y R. Cheddadi. Refining vegetation simulation models: From plant functional types to bioclimatic affinity groups of plants. *Journal of Vegetation Science*. 15: 739-746, 2004.

Laurent, J. M., L. François, A. Bar-Hen, L. Bel y R. Cheddadi. European bioclimatic affinity groups: Data-Model comparisons. *Global and Planetary Change*. 61: 28-40, 2008.

Lawrence, D. R. The nature and structure of paleoecology. *Journal of Paleontology*. 45(4): 593-607, 1971.

Liu, K. B., C. A. Reese y L. G. Thompson. Ice-core pollen record of climatic changes in the central Andes during the last 400 yr. *Quaternary Research*. 64: 272-278, 2005.

Luebert, F. y P. Plissock. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 2006.

Luebert, F. y R. Gajardo. Vegetación de los Andes áridos del norte de Chile. *Lazaroa* 21: 111-130, 2000.

Luebert, F. y R. Gajardo. Vegetación alto-andina de Parinacota (norte de Chile) y una sinopsis de la vegetación de la Puna meridional. *Phytoconologia* 35: 79-128, 2005.

Luo, C., Z. Zheng, P. Tarasov, T. Nakagawa, A. Pan, Q. Xu, H. Lu y K. Huang. A potential of pollen-based climate reconstruction using a modern pollen-climate dataset from arid northern and western China. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 160: 111-125, 2010.

Luoto, T. P. Intra-lake patterns of aquatic insect and mite remains. *Journal of Paleolimnology*. 47: 141-157, 2012.

Lyford, M. E., S. T. Jackson, S. T. Gray y R. G. Eddy. Validating the use of woodrat (*Neotoma*) middens for documenting natural invasions. *Journal of Biogeography*. 31: 1-10, 2004.

Maldonado, A., J. L. Betancourt, C. Latorre y C. Villagrán. Pollen analyses from a 50,000-yr rodent midden series in the southern Atacama Desert (25.300 S). *Journal of Quaternary Science*. 20: 493-507, 2005.

Maldonado, A. y L. González. Análisis de polen fósil en paleomadrigueras de roedores, en la precordillera del Salar del Huasco, etapa II. Informe de avance Proyecto FONDECYT#1080458. 2012.

Marchant, R., H. Behling, J. C. Berrio, A. Cleef, J. Duivenvoorden, H. Hooghiemstra, P. Kuhry, B. Melief, B. van Geel, T. van der Hammen, G. van Reenen y M. Wille. Mid- to Late-Holocene pollen-based biome reconstructions for Colombia. *Quaternary Science Reviews*. 20: 1289-1389, 2001.

Markgraf, V. Late and postglacial vegetational and paleoclimatic changes in subantarctic, temperate, and arid environments in Argentina. *Palynology*. 7: 43-70, 1983.

Markgraf, V. y H. L. D'Antoni. *Pollen Flora of Argentina. Modern Spores and Pollen Types of Pteridophyta, Gymnospermae and Angiospermae*. Tucson, The University of Arizona Press, 1978.

Markgraf, V., R. S. Webb, K. H. Anderson y L. Anderson. Modern pollen/climate calibration for southern South America. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*. 181: 375-397, 2002.

Marquet, P. A., F. Bozinovic, G. A. Bradshaw, C. Cornelius, H. Gonzalez, J. R. Gutierrez, E. R. Hajek, J. A. Lagos, F. Lopez-Cortes, L. Nunez, E. F. Rosello, C. Santoro, H. Samaniego, V. G. Standen, J. C. Torres-Mura y F. M. Jaksic. Ecosystems of the Atacama Desert and adjacent Andean area in northern Chile. *Revista Chilena De Historia Natural*. 71(4): 593-617, 1998.

Martcorena, C., O. Matthei, R. Rodríguez, M. Arroyo, M. Muñoz, F. Squeo y G. Arancio. Catálogo de la flora vascular de la Segunda Región (Región de Antofagasta), Chile. *Gayana botánica*. v. 55(1): 23-83, 1998.

Martcorena, A., V. Pardo, A. Peñaloza, M.A. Negritto, L. A. Cavieres & M. Parada. Adiciones y notas a la flora del Parque Nacional Llullaillaco, II Región, Chile. *Gayana Botánica* 61: 49 – 54, 2004.

Minvielle, M. y R. D. Garreaud. Projecting rainfall changes over the South American Altiplano. *American Meteorology Society*. 24: 4577-4583, 2011.

Minvielle, M. y R. D. Garreaud. Projecting Rainfall Changes over the South American Altiplano. *Journal of Climate*. 24(17): 4577-4583, 2011.

MOP. Plan de obras públicas para Iquique. Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. 38, 2005.

Morales, M. S., D. A. Christie, R. Villalba, J. Argollo, J. Pacajes, J. S. Silva, C. A. Alvarez, J. C. Llanabure y C. C. Soliz-Gamboa. Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300 AD reconstructed by tree-rings. *Climate of the Past*. 8: 653-666, 2012.

Moreno, P. I., C. Villagrán, P. A. Marquet y L. G. Marshall. Quaternary paleobiogeography of northern and central Chile. *Revista Chilena de Historia Natatural*. 67: 487-502, 1994.

Moreno, S. Modificación de los manejos pastoriles de las comunidades Aymaras del Salar del Huasco y de Lirima (región de Tarapacá). Tesis para optar al Grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Santiago. Universidad de Chile, 2011.

Nakagawa, T., P. Tarasov, K. Nishida, K. Gotanda y Y. Yasuda. Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and Late Quaternary spectra. *Quaternary Science Reviews*. 21: 2099-2113, 2002.

Naoki, K., G. M., R. López, R. Meneses y J. Vargas. Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*. 41(1): 65-78, 2006.

Navarro, G. y S. Rivas-Martínez. Datos sobre la fitosociología del norte de Chile: la vegetación en un transecto desde San Pedro de Atacama al volcán Licancabur (Antofagasta, II Region). *Chloris Chilensis* 8(2). 2005.

New, M., D. Lister, M. Hulme y I. Makin. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*. 1-25: 2002.

Nuñez, L., M. Grosjean y I. Cartajena. Human occupations and climate change in the Puna de Atacama, Chile. *Science*. 298: 821-824, 2002.

Nuñez, L., M. Grosjean y I. Cartajena. Ocupaciones humanas y paleoambientes en la Puna de Atacama. Universidad Católica del norte, Taraxacum, San Pedro de Atacama, 2005.

Nuñez, L. y C. Santoro. Cazadores de la Puna Seca y Salada del área centro sur Andina (norte de Chile). *Estudios Atacameños*. 9: 13-65, 1988.

Ortega-Rosas, C. I., J. Guiot y M. C. Peñalba. Biomization and quantitative climate reconstruction techniques in northwestern Mexico—With an application to four Holocene pollen sequences. *Global and Planetary Change*. 61: 242-266, 2008.

- Ortiz, M., L. Morales, P. Silva y E. Acevedo. Estimación del nivel freático a partir del NDVI Landsat en la Pampa del Tamarugal (Chile). *Revista de Teledetección*. 37: 42-50, 2012.
- Ossandon, O. Perspectivas geográficas de desarrollo del sector Huasco-Pampa Lirima. Altiplano I Región, al interior de Iquique. *Revista Geográfica de Valparaíso*. 22-23: 279-288, 1992.
- Petit, R., A. Hampe y R. Cheddadi. Climate Changes and tree phylogeography in the Mediterranean. *TAXON*. 554(4): 877-885, 2005.
- Pimentel, F. Informe geológico resumido: Área San Pedro de Atacama. *Estudios Atacameños*. 4: 13-17, 1976.
- Placzek, C., J. Quade, J. L. Betancourt, J. Patchett, J. A. Rech, C. Latorre, A. Matmon, C. Holgren y N. English. Climate in the dry central Andes over geologic, millennial, and interannual timescales. *Annual Missouri Botanical Garden* 96: 386-397, 2009.
- Prentice, I. C., J. Guiot, B. Huntley, D. Jolly y R. Cheddadi. Reconstructing biomes from palaeoecological data: a general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Climate Dynamics*. 12: 185-194, 1996.
- Pueyo, J., A. Sáez, S. Giralt, B. Valero-Garcés, A. Moreno, R. Bao, A. Schwalb, C. Herrera, B. Klosowska y C. Taberner. Carbonate and organic matter sedimentation and isotopic signatures in Lake Chungará, Chilean Altiplano, during the last 12.3 kyr. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*. 307: 339-355, 2011.
- Quintanilla, V. *Fitogeografía y Cartografía de la vegetación de Chile Árido*. Contribuciones Científicas y Técnicas. Universidad de Santiago. 18: 5-28, 1988.
- Raper, D. y H. Zander. Paleoeecology: An untapped resource for teaching environmental change. *International Journal of Environmental & Science Education*. 4(4): 441-447, 2009.
- Riedemann, P., G. Aldunate y S. Teillier. *Flora nativa de valor ornamental, identificación y propagación*. Chile: Zona Cordillera de los Andes. Corporación Jardín Botánico Chagual, 2008.

Romero, H., M. Mendonça, M. Mendez y P. Smith. Macro y mesoclimas del Altiplano andino y desierto de Atacama: desafíos y estrategias de adaptación social ante su variabilidad. *Revista Norte Grande*. 2012 (Enviada).

Rundel, P., A. Gibson, G. Midgley, S. Wand, B. Palma, C. Kleir, y J. Lambrinos. Ecological and ecophysiological patterns in a prealtiplano shrubland of the Andean Cordillera in northern Chile. *Plant ecology*, 169:179-193, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, 15pp. 2003.

Saavedra, B. *Phyllotis spp.* [fotografía] [en línea] En: <http://www.ecoly.ma.cl/galeria/albums/Subidas_res_nac_las_chinchillas_BS/normal_Foto17.JPG> [consulta 26 septiembre 2013]

Salonen, J. S., H. Seppä, M. Luoto, A. E. Bjune y H. J. B. Birks. A North European polleneclimate calibration set: analysing the climatic responses of a biological proxy using novel regression tree methods. *Quaternary Science Reviews*. 45: 95-110, 2012.

Salonen, J. S., H. Seppä, M. Väliranta, V. Jones, A. Self, M. Heikkilä, S. Kultti y H. Yang. The Holocene thermal maximum and late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia. *Quaternary Research*. 75(501-511): 2011.

Sandoval, A. *Octodontomys gliroides*. [fotografía] [en línea] En: <<http://2.bp.blogspot.com/-yNgfHhcjtvS/UZa0oFGFBRI/AAAAAAAAQS8/K9CPKdp9G8g/s1600/octod+gliroi8.jpg>> [consulta 26 septiembre 2013]

Schäbitz, F. Estudios polínicos del Cuaternario en las regiones áridas del sur de Argentina. *Revista del Museo de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia, Nueva Serie*. 5: 291-300, 2003.

Shennan, I. y S. L. Hamilton. Late Holocene Paleoseismicity and associated land / sea level change in the greater Anchorage area. 2003.

Stockmarr, J. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen spores*. 13: 615-621, 1971.

Teillier, S. Flora del salar de Ascotan, Región de Antofagasta (II Región), Chile. *Chloris chilensis*. Disponible en línea

<http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/textoshu/index/assoc/HASH015d.dir/Otros-HUMED15.pdf> Último acceso [24 de Febrero de 2012]. 2012.

Teillier, S. Catálogo de la plantas vasculares del área altoandina de salar de Coposacordón Collaguasi. Chile, región de Tarapacá (I). *Chloris Chilensis*. Año 2 (1): 1999.

Tellier, S. Flora y vgetación alto-andina del área de Collaguasi-Salar de Coposa, Andes del norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 71: 313-329, 1998.

Ter Braak, C. J. F. y L. G. Barendregt. Weighted Averaging of species indicator values: its efficiency in environmental calibration. *Mathematical Biosciences*. 78: 57-72, 1986.

Ter Braak, C. J. F., S. Juggins, H. J. B. Birks y H. Van der Voet. Weighted averaging partial least squares regression (WA-PLS): definition and comparison with other methods for speciesenvironment calibration. EN: G. P. Patil and C. R. Rao, "*Multivariate environmental statistics*". Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1993. 525-560.

Ter Braak, C. J. F. y C. I. Prentice. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*. 18: 271-313, 1988.

Ter Braak, C. J. F. y H. Van Dam. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. *Hydrobiologia*. 178: 209-223, 1989.

Tonello, M., M. V. Mancini y H. Seppä. Quantitative reconstruction of Holocene precipitation changes in Southern Patagonia. *Quaternary Research*. 72: 410-420, 2009.

Tonello, M. y A. Prieto. Tendencias climáticas para los pastizales pampeanos durante el Pleistoceno tardío-Holoceno: estimaciones cuantitativas basadas en secuencias polínicas fósiles. *Ameghiniana (Rev. Asoc. Paleontol. Argent.)*. 47(4): 501-514, 2010.

Traverse, A. *Paleopalynology*. Second Edition (Topics in Geobiology 28). Springer, Dordrecht, Netherlands, 2007.

Tröger, U. y D. Gerstner. Estudio de investigación de la situación hidrogeológica en la formación Altos de Pica. Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. 28, 2004.

Troll, C. Las culturas superiores Andinas y el medio geográfico [traducido por Carlos Nicholson en base al texto original en alemán de 1943]. *Revista del Instituto de Geografía*. 5: 1958.

Uribe, J.M., R. Cabrera, A. De La Fuente & M. Paneque. Atlas bioclimático de Chile. Universidad de Chile - CORFO - Ministerio de Bienes Nacionales, Santiago. 2012.

Urrutia, R. y M. Vuille. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Geophysical Research*. 114(2): 2009.

Van Kessel, J. la lucha por el agua de Tarapacá; la visión andina. *Revista Chungará*. 14: 141-155, 1985.

Villagrán, C., J. Armesto y M. T. Kalin Arroyo. Vegetation in a high Andean transect between Turi and Cerro León in Northern Chile. *Vegetatio*. 48: 3-16, 1981.

Villagrán, C., M. T. K. Arroyo y C. Marticorena. Efectos de la desertización en la distribución de la flora andina de Chile *Revista Chilena De Historia Natural*. 56: 137-157, 1983.

Villagrán, C., M. Romo y V. Castro. Etnobotánica del sur de los Andes de la 1ª Región de Chile: un enlace entre las culturas altiplánicas y las de quebradas altas del Loa Superior. *Chungará*. 35(1): 73-124, 2003.

Vitale, S. *Lagidium viscacia*. [fotografía] [en línea] En: <<http://www.fotonat.org/data/media/7/DSC06244-Chinchilln-Comun-Lagidium-viscacia-silvia-vitale.jpg>> [consulta 26 septiembre 2013]

Vuille, M. y C. Ammann. Regional snowfall patterns in the high, arid Andes. *Climatic Change*. 36: 413-423, 1997.

Vuille, M. y F. Keimig. Interannual variability of summertime convective cloudiness and precipitation in the central Andes derived from ISCCP-B3 data. *American Meteorology Society*. 17: 3334-3348, 2004.

Wahl, E. Pollen surface samples for paleoenvironmental reconstructions from the coast and transverse ranges of southern California. *Madroño*. 50: 289-299, 2003.

Walker, I. R., A. J. Levesque, L. C. Cwynar y A. F. Lotter. An expanded surface-water palaeotemperature inference model for use with fossil midges from eastern Canada. *Journal of Paleolimnology*. 18(2): 165-178, 1997.

Wiens, J. J. y C. H. Graham. Niche Conservatism: Integrating Evolution, Ecology, and Conservation Biology. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 36: 519-539, 2005.

Wilmshurst, J. M., S. K. Wiser y D. J. Charman. Reconstructing Holocene water tables in New Zealand using testate amoebae: differential preservation of tests and implications for the use of transfer functions. *The Holocene*. 13(1): 61-72, 2003.

Williams, J. W., R. Summers y T. Webb III. Applying plant functional types to construct biome maps from eastern North American pollen data: comparisons with model results. *Quaternary Science Reviews*. 17: 607-627, 1998.

Wilson, R. *Lagidium peruanum*. [fotografía] [en línea] En: <<http://www.raywilsonbirdphotography.co.uk/Galleries/Mammals/images/viscacha.jpg>> [consulta 26 septiembre 2013]