

Dendrocronología en la Pampa del Tamarugal, Desierto de Atacama, Norte de Chile

Dendrochronology in the Pampa of Tamarugal, Atacama Desert, North of Chile

Mario A. Rivera*
Jorge Moya R.**
Daniel E. Shea***

RESUMEN

Se presentan resultados preliminares de las primeras investigaciones dendroarqueológicas realizadas en el Desierto de Atacama. Este estudio confirma la factibilidad de investigar condiciones climáticas y ambientales a partir del análisis de las anillas de las dos especies más características del desierto, Prosopis tamarugo Phil y Prosopis alba Griseb. Se obtuvieron dos secuencias flotantes, una contemporánea y una arqueológica, de las cuales la primera arrojó una secuencia pormenorizada de 76 años a partir del año 1932 de la era. La segunda, sobre la base de muestreo de la aldea de Ramaditas, contiene una amplitud de 90 años a partir de Cal BP 2720.

Palabras clave

Dendrocronología, Desierto de Atacama, Prosopis sp.

ABSTRACT

Preliminary results on the first dendroarchaeological research done in the Atacama Desert are presented. This study confirms the feasibility for researching the climatic and environmental conditions from tree ring analysis of the two most characteristic species that grow in the arid Atacama, Prosopis tamarugo Phil, and Prosopis alba Griseb. Two floating sequences were obtained: one contemporary, and one archaeological. The first one gave a detailed sequence of 76 years from 1932 onwards. The second one, based on samples taken from the village site of Ramaditas, represents 90 years from Cal BP 2720 onwards.

Key words

Dendrochronology, Atacama Desert, Prosopis sp.

Recibido: julio de 2010
Aceptado: octubre de 2010

* Beloit College, Department of Anthropology, 7710 S. Manitowoc Ave. Oak Creek, WI 53154, USA; Calle Vicuña 610, La Serena, Chile. Email: myxriviera@att.net

** Universidad Austral de Chile, Laboratorio de Dendrocronología, Independencia 641, Valdivia, Chile.

*** Beloit College, Department of Anthropology, 700 College Street, Beloit, Wisconsin 53511, USA.

Introducción

El presente trabajo contiene los primeros resultados de un largo proyecto de investigación que tiene como objetivo estudiar, a través de métodos dendrocronológicos, las condiciones medioambientales en sectores específicos del Desierto de Atacama (Figura 1). Constituye una nueva etapa que incluye investigaciones arqueológicas sobre la base del estudio de procesos de adaptación a las condiciones áridas del desierto por parte de sociedades prehispánicas. Durante más de 15 años y contando con un grupo multidisciplinario hemos centrado nuestro estudio en la Quebrada de Guatacondo (21°01'S - 69°22'W) Región de Tarapacá, Chile, en particular trabajando el sitio arqueológico de Ramaditas, antiguo asentamiento aldeano de más de 2.600 años de antigüedad que destacó por ser un centro multiactivo con énfasis en experimentación metalúrgica de cobre y producción agrícola en el desierto más árido del mundo y a la vez e inserto en una importante red de rutas caravaneras que conectaban la costa con la región altoandina (Rivera 2002; Rivera 2005;

2006, Rivera *et al.* 1995/96; Shea y Rivera 2004; Graffam *et al.* 1994, 1996, 1997).

En este trabajo presentamos los resultados preliminares de investigaciones dendroarqueológicas que confirman la factibilidad de estudiar condiciones climáticas y ambientales a partir del estudio de las anillas de las dos especies más características del desierto, *Prosopis tamarugo* Phil y *Prosopis alba* Griseb. El estudio dendrocronológico de estas muestras nos entrega datos complementarios que hacen posible una mejor interpretación acerca del desarrollo de las condiciones climáticas y ambientales del desierto con mayor profundidad cronológica.

Dentro de los registros paleoambientales, la dendrocronología constituye uno de los registros más importantes y exactos pues tiene una resolución anual e involucra escalas temporales que son aptas para el estudio de los cambios medioambientales presentes y pasados. Esta disciplina científica permite disponer de registros ecológicos y climáticos de alta resolución a partir de las variaciones en el crecimiento del ancho de los anillos de especies leñosas. De esta forma se logra abarcar largos períodos de tiempo, lo que permite hacer reconstrucciones del pasado. Como muy bien señalan Dean y Doyel (2006), los procesos naturales y culturales están estructurados sobre la base de variaciones a través de un largo tiempo, de manera que el proceso de adaptabilidad del comportamiento humano así como la variabilidad ambiental deben ser estudiados con una perspectiva de largo aliento. De esta forma, la interacción hombre-medio ambiente es crucial como objetivo de gran alcance en nuestra propuesta.

Desde este punto de vista nos interesa despejar incógnitas tales como ¿qué pudo haber causado la desaparición de las formaciones boscosas de *Prosopis* en Atacama? Si existió un cambio importante de las condiciones ambientales de la Pampa del Tamarugal y por extensión al Desierto de Atacama, ¿cuál pudo haber sido la causa de estos cambios?, y ¿cuál el impacto humano sobre el medio ambiente o viceversa?

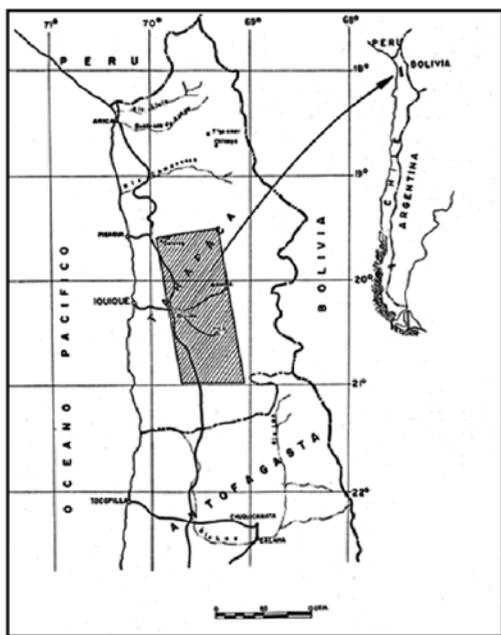


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de la Pampa del Tamarugal.

El uso de vigas y postes de madera del género *Prosopis* en la construcción de los recintos habitacionales de Ramaditas, más la disponibilidad de árboles vivos en el área y de material enterrado producto de las inundaciones a causa de las precipitaciones en la meseta altoandina, ha permitido coleccionar suficientes muestras para dar pasos preliminares en la realización de las primeras cronologías que permitirán hacer reconstrucciones del clima del pasado en el Desierto de Atacama.

Con la realización de las primeras cronologías de material tanto arqueológico como vivo se podrá comprender la dinámica del ciclo hídrico y del manejo del desierto por parte de sociedades que lograron producir en una de las áreas más inhóspitas del planeta hace más de 2.600 años.

Los resultados del proyecto de investigación que aquí se disponen están orientados a estudiar las condiciones climáticas y medioambientales del Desierto de Atacama que a su vez se complementan con las secuencias obtenidas a partir de *Polylepis tarapacana* (queñua) en las tierras altas vecinas cuyas series presentan una cronología retrospectiva

de hasta 800 años (Argollo 2004; Soliz *et al.* 2009; Christie *et al.* 2009; Moya 2006). Sin embargo, el principal objetivo consiste en determinar la potencialidad de las especies *Prosopis tamarugo* y *Prosopis alba* en la utilización de su madera con fines dendrocronológicos y dendroarqueológicos en la Pampa del Tamarugal y la factibilidad de desarrollar, a partir de madera coleccionada en el sitio arqueológico de Ramaditas y otros similares, la primera cronología de ancho de anillos en Chile.

Los sitios de estudio se encuentran ubicados en la Región de Tarapacá, norte de Chile. El área corresponde a una cuenca ubicada en medio del desierto más árido del mundo, que lleva por nombre Pampa del Tamarugal, debido a la presencia del tamarugo, árbol endémico que le da nombre al lugar.

Las muestras fueron coleccionadas en sitios arqueológicos destacando la Aldea de Ramaditas, antiguo asentamiento humano con más de 2.600 años de antigüedad. Además, se coleccionaron muestras de árboles aislados tanto vivos como muertos en un amplio sector de la Pampa, como de la vecindad de sitios poblados.



Figura 2. Poste soporte de techo recinto 1 Ramaditas.

Fisiognómicamente la Pampa del Tamarugal es una gran cuenca endorreica que en la actualidad se encuentra completamente seca y cubierta en las partes más bajas con una gruesa capa de sales. Esta cuenca se encuentra rodeada en la parte oriental por grandes abanicos aluviales formados a la salida de las quebradas que abandonan la Cordillera de los Andes formando depósitos pedemontanos. En la parte occidental, la Pampa se ve limitada por la Cordillera de la Costa. Se extiende desde 19°17'S hasta los 21°20'S de latitud Sur.

Según Di Castri y Hajek (1976), climatológicamente esta área corresponde al desierto absoluto. Gajardo (1993) clasifica el área como subregión del Desierto del Tamarugal debido a la influencia de las napas freáticas que sustentan la presencia de vegetación mayor. Las temperaturas se caracterizan por presentar fuertes oscilaciones diarias, fluctuando entre mínimas absolutas de -5 a -12°C y con máximas absolutas de 36 y 40°C, con un promedio de 250 días despejados al año.

La humedad relativa del aire registrada muestra grandes oscilaciones diarias, especialmente en los meses de septiembre a

marzo, alcanzando 3-10% durante el día y 80-100% en la noche, manteniéndose durante 4 a 5 horas, para luego caer abruptamente a mediodía (Fuenzalida 1971).

Respecto de los suelos, el sector oriental, y a la vez más alto de la Pampa, corresponde a un gran piedemonte con estratificación grosera, no estructurado, con alto contenido salino y carente de materia orgánica. Los sectores más bajos corresponden a la sección occidental formada por suelos estratificados, con materiales más finos y cubiertos con una costra salina que va desde unos pocos centímetros hasta un metro o más de profundidad. En estos suelos predominan los materiales arcillosos y limosos, estratificados y con una cubierta de sales de espesor variable que va de unos pocos centímetros hasta un metro o más. Las sales que componen estos salares son, generalmente, de sodio, calcio, magnesio y potasio, delicuescentes, de modo que da la impresión de encontrar un suelo permanentemente húmedo (IREN 1976).

En estas condiciones es que se desarrolla el tamarugo (*Prosopis tamarugo* Phil.), árbol que pertenece al orden Leguminosas, familia de las Mimosácea (Figura 3). Es una



Figura 3. Tamarugos nativos Reserva Pampa Tamarugal.

especie endémica de un área específica del Desierto de Atacama que a pesar de su gran importancia ecológica es poco conocida, ignorándose las etapas de desarrollo desde su aparición.

Estudios previos han determinado edades aproximadas a los cuatrocientos años de edad, creciendo sobre los salares de la Pampa del Tamarugal con ausencia casi total de precipitaciones, aprovechando solamente las aguas subterráneas. Como bien indican Beresford-Jones *et al.* (2009:309), "as witnesses of ecological change, *Prosopis* fossils effectively "compress time".

Alcanza un promedio de 15 metros de altura, 0,50 a 0,80 m de diámetro en el tronco y un diámetro de copa de 15 a 20 metros. Sus ramas nuevas son delgadas y angulosas y poseen espinas de base ancha y de unos 3 cm de largo. Las hojas compuestas son cortas y caedizas. El fruto es una legumbre gruesa y corta de 25 mm. Las semillas son pequeñas, de color oscuro, comprimidas y separadas por tabiques (Habit 1981).

Las flores del tamarugo son polinizadas por insectos himenópteros que son sus principales agentes polinizadores, con un período de actividad máxima entre comienzos de septiembre y noviembre.

El crecimiento del árbol ocurre prácticamente durante todo el año. Sin embargo, presenta un período de máximo crecimiento entre los meses de agosto a noviembre que coincide con la época de floración plena y producción de semillas. El período de receso o de mínimo crecimiento va entre los meses de marzo a julio, estableciéndose un período de receso invernal, por la inactividad salavial.

El tamarugo posee un sistema radicular doble, conformado por una raíz pivotante o de anclaje, formado por tres a cuatro raíces gruesas, suberizadas y lignificadas que alcanzan una profundidad máxima en suelos francos de 7 a 8 metros (Sudzuki 1969) y una masa o conjunto de raíces absorbentes laterales 20 a 50 centímetros de espesor, que abarca un

perímetro aproximadamente igual a la copa del árbol (Ffolliott y Thames 1983).

La fisiología del tamarugo es muy particular; en determinadas condiciones de alta humedad atmosférica (sobre 80%) absorbe agua a través de su sistema foliar transportándola al sistema radicular y depositándola en la microrizosfera de donde es reabsorbida como agua (Sudzuki 1969).

El Algarrobo (*Prosopis alba* Griseb.), al igual que el tamarugo, es un árbol que pertenece al orden Leguminosae, familia de las Mimosácea. Es una especie endémica de América del Sur, encontrándose en una amplia zona comprendida entre Argentina, Perú, Bolivia, Paraguay y norte de Chile.

A diferencia del tamarugo, el Algarrobo es una especie acompañante formando bosques abiertos con otras especies. Puede alcanzar alturas superiores a los 15 metros con un tronco corto de hasta un metro de diámetro. La copa puede cubrir una gran superficie, con ramas fuertemente ramificadas y péndulas. Presenta una raíz central, que primero tiene un crecimiento vertical para luego desarrollar raíces adventicias (Figura 4).

Las flores son pequeñas, de coloración blanco verdosa a amarillenta, hermafroditas. La polinización se realiza mediante insectos o el viento. El fruto es una vaina de hasta 20 centímetros de largo, con semillas pardas de 7 milímetros de largo conteniendo una pasta muy rica en azúcares y calorías.

Es una especie que se caracteriza por su alta variabilidad genética, presente tanto a nivel intrapoblacional como intraespecífico. Esto le da una gran plasticidad, lo que explica su amplia distribución. Es muy tolerante a las sequías.

Procesamiento de las muestras y desarrollo de las cronologías

En el sitio arqueológico Ramaditas se coleccionaron muestras de secciones transversales tanto de algunas vigas y postes soportantes

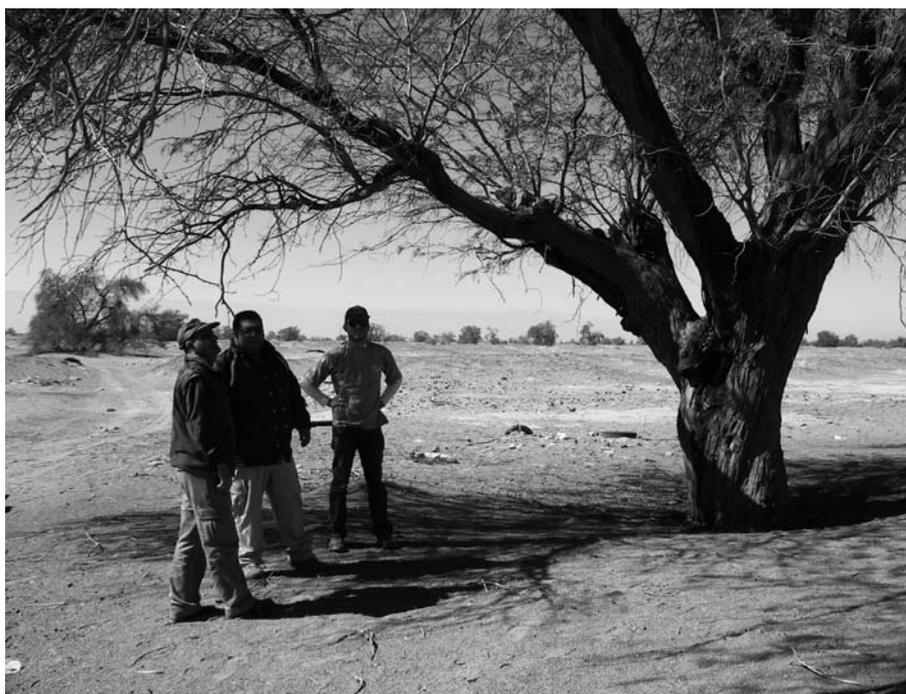


Figura 4. Algarrobo adulto en la Pampa del Tamarugal.

de techo que conformaban el complejo habitacional de la Aldea Ramaditas. Además, se colectaron muestras adicionales de material vivo y muerto de *Prosopis tamarugo* y *Prosopis alba* en diferentes sectores de la Pampa del Tamarugal.

Debido a la gran superficie potencial a muestrear primero se comenzó con los puntos conocidos y de fácil acceso, como oasis, quebradas, y localidades pobladas, para luego continuar con los lugares de difícil acceso y que fueron consignados gracias a relatos de personas que por años vivieron en la región.

Una vez en el laboratorio, las muestras fueron procesadas según los métodos descritos por Stokes y Smiley (1968). Las rodelas fueron emparejadas con un cepillo eléctrico, posteriormente pulidas con lijas al agua de diferente granulometría (desde 180 hasta 1.500), hasta lograr distinguir claramente los anillos, los que se distinguen por la formación de una delgada banda parenquimática al final del período vegetativo (figuras 5 y 6).

Una vez pulidas las muestras se analizaron bajo lupa estereoscópica para realizar el conteo de los anillos. Luego se midió el ancho de los anillos de crecimiento utilizando un dendrómetro Velmex conectado a un computador con una precisión de 0,001 milímetro (Robinson y Evans 1980). Para las rodelas de árboles vivos se adoptó la convención de Schulman (1956), para el Hemisferio Sur, que asigna a cada anillo de crecimiento la fecha en que se dio inicio al crecimiento (primavera). De esta forma, el anillo que comenzó a crecer en la primavera del 2007 se fechó como de ese mismo año.

Para el caso específico de las muestras obtenidas de los sitios arqueológicos y por no conocerse el año de formación del primer anillo, estas se ingresaron al programa como Undated, generándose una cronología "flotante".

Acto seguido se procedió al cofechado, que es definido como el principio más importante de la dendrocronología. Este principio se basa en la sincronización anual entre las

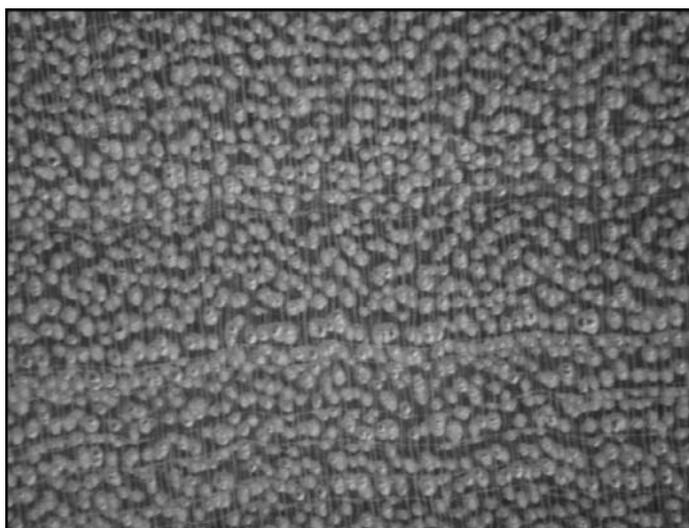


Figura 5. Fotografía a través de lupa de aumento, donde se distinguen los anillos de crecimiento en *Prosopis tamarugo*.



Figura 6. Muestra de tamarugo preparada para análisis dendrocronológico.

variaciones de crecimiento de varios árboles creciendo en un mismo sitio. La sincronización se atribuye a los efectos limitantes de las variaciones climáticas sobre el crecimiento de los árboles, y por consiguiente en los anillos, quedando registrado en el ancho de los anillos de un gran número de árboles bajo una misma condición macro o microclimática (Fritts 1976). Además, el cofechado permite la detección y corrección de posibles errores debido a una falta de sincronía a causa de

anillos faltantes, anillos falsos o simplemente errores en la medición. De esta forma, el cofechado permite otorgar un año calendario a cada anillo de crecimiento, y asegurar que estos estén ubicados correctamente siguiendo una secuencia temporal y lógica (Fritts 1976; Holmes 1983).

Las primeras muestras que deben ser cofechadas corresponden al material vivo. Con esto, el programa COFECHA (Holmes 1983)

entrega una cronología denominada “cronología maestra”, a la que posteriormente se le pueden ingresar muestras de árboles muertos a las cuales no se les conoce el año de inicio. El fechado de estas muestras se hace ingresando las mediciones de las series como “no fechadas” al programa COFECHA, el que permite determinar mediante correlaciones el año inicial de las rodelas o restos de material muerto.

Posteriormente, el programa COFECHA ajusta cada serie individual a una curva muy flexible (*spline* cúbico de 32 años) y promedia las series para obtener finalmente la cronología maestra (Holmes 1983). De esta forma el programa COFECHA identifica segmentos de 25 años con traslajos de 12 años, para poder identificar aquellos segmentos con posibles problemas debido a anillos faltantes o sobrantes en las series. El programa constituye una herramienta fundamental para mejorar la calidad de los datos a través de la detección y corrección de los posibles errores de fechado o medición.

Con las series ya fechadas se realizó a continuación un proceso de estandarización para poder generar una cronología promedio de la zona estudiada (Fritts 1976; Cook 1985). La estandarización se realizó utilizando el programa ARSTAN (Cook y Holmes 1984; Cook 1985). Este programa genera una cronología promediando las series de ancho de anillos estandarizadas de manera de remover los efectos producto de la disminución en el crecimiento de los árboles a causa de la edad y de los cambios en la geometría, reduciendo la varianza entre las series al eliminar la tendencia de crecimiento biológico de los árboles. Producto de esto, las series estandarizadas

tienen una media igual a uno y una varianza homogénea a lo largo de la vida del árbol (Fritts 1976; Cook 1985).

De acuerdo a los objetivos de este estudio se utilizó un método de estandarización en que las series de anchos de anillos se ajustaron a una curva exponencial negativa, o a una regresión lineal de acuerdo al mejor ajuste para cada una de las series. Las cronologías fueron desarrolladas con el programa ARSTAN (Cook y Holmes 1984), utilizando la versión ESTÁNDAR y RESIDUAL.

La versión ESTÁNDAR preserva la señal de baja frecuencia, mientras que la cronología RESIDUAL conserva la señal de alta frecuencia, lo que la hace recomendable en los estudios dendroclimatológicos. En este último caso se remueve la autocorrelación presente en las series de ancho de anillos (componente biológico), con la finalidad de determinar el correcto nivel de significancia de algunos estadísticos.

Resultados

Con la metodología antes descrita se obtuvieron dos cronologías de ancho de anillos. La primera se realizó con las muestras arqueológicas de la Aldea Ramaditas. La segunda cronología se logró a partir de las muestras obtenidas en diferentes localidades de la Pampa del Tamarugal.

La cronología generada en Ramaditas abarcó un total de 90 años. En tanto, la longitud de la cronología de muestras actuales de tamarugo y algarrobo alcanzó 76 años (Cuadro 1).

Cuadro 1

Resumen de series incluidas en las cronologías

Sitio	N° total series medidas	N° series incluidas en cronología final	Amplitud		Años
			Inicio	Final	
Ramaditas	51	40	0	90	90
Pampa del Tamarugal	42	23	1932	2007	76

Se obtuvieron, además, dos fechados AMS de la muestra más relevante obtenida del sitio de Ramaditas. De dicha muestra se fechó el primer y último anillo (Cuadro 2).

En el Cuadro 3 se entrega un resumen de los principales estadígrafos de las cronologías Ramaditas y Pampa del Tamarugal. De ellas destaca la sensibilidad media de la cronología Ramaditas con 0,342.

Por otra parte, la desviación estándar para ambas cronologías es de 0,437 para Ramaditas

y de 0,278 para Pampa del Tamarugal. La autocorrelación de primer orden también resultó ser similar en ambos sitios con valores superiores a 0,4 (0,489 y 0,6958 para Ramaditas y Pampa del Tamarugal, respectivamente). En la misma tabla se destaca la similitud en ambos sitios para los valores de la varianza del primer autovector y de la correlación entre árboles.

La Figura 7 muestra el valor medio de las mediciones crudas de todas las muestras incluidas en la cronología maestra de Ramaditas (40),

Cuadro 2

Fechado AMS muestra de Ramaditas

Laboratorio	Muestra	Convencional	Calibrada 2 sigma
Beta-256957-AMS	RAM-130	2490 ± 40 BP	Cal BP 2740-2360
Beta-256958-AMS	RAM-131	2530 ± 40 BP	Cal BP 2750-2480

Cuadro 3

Resumen de los estadígrafos arrojados por el programa ARSTAN para las cronologías Ramaditas y Pampa del Tamarugal. Los estadígrafos son para las cronologías Estándar

Sitio	Sensibilidad media	Desviación estándar	Autocorrelación de 1 ^{er} orden	Varianza del 1 ^{er} autovector	Correlación entre árboles
Ramaditas	0,3420	0,437	0,4892	30,3 %	0,280
Pampa del Tamarugal	0,1898	0,278	0,6958	50,7 %	0,152

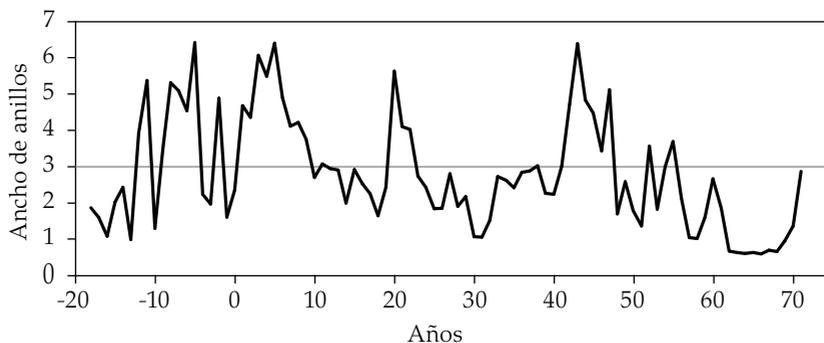


Figura 7. Valor medio del total de las mediciones para las muestras colectadas en el sitio arqueológico Ramaditas.

ajustadas a una curva exponencial negativa, donde destacan los altos y bajos en el crecimiento de los anillos. Esta situación indica claramente la potencialidad de las muestras del sitio arqueológico de Ramaditas, debido a que presentan variaciones muy claras en el crecimiento de los anillos entre un año y otro. Situación que se debe a la respuesta de los árboles a las variaciones del clima imperante en la zona, mostrando períodos de mayor incremento del ancho de los anillos en respuesta a mejores condiciones para el crecimiento.

La Figura 8 muestra la cronología ESTÁNDAR donde se ven cuatro períodos de crecimiento bajo la media (en los años 0, antes de la década del 20, la década del 30, y finales en la década del 60). De la misma forma presenta cuatro períodos de crecimiento por sobre la media, destacando el del año 20 y del 45.

En la misma Figura 8 se muestra que el mayor número de muestras colectadas se concentra en los primeros años (0 al 40), indicando con esto una mayor confiabilidad de la cronología en ese período, lo que señala que a medida que se tengan mayor número de muestras

replicadas, mejor es la confiabilidad de la cronología.

Al igual que la figura anterior, la cronología RESIDUAL (Figura 9) presenta períodos de crecimiento por sobre y bajo la media, mostrando una mayor variabilidad de alta frecuencia interanual.

En la Figura 10 se muestran los cambios en el estadístico Rbar, utilizando ventanas de 25 años con traslajos en 12 años. Destaca el estadístico EPS en la cronología Ramaditas con valores en general muy cercanos al umbral fijado por literatura (0,85) (Wigley *et al.* 1986; Briffa 1995). Esto indica que hay una señal común adecuada en casi todas las muestras colectadas en el sitio Ramaditas.

La Figura 11 muestra el valor medio de las mediciones crudas de todas las muestras incluidas en la cronología maestra de Pampa del Tamarugal, ajustadas a una curva exponencial negativa, donde destacan los altos y bajos en el crecimiento de los anillos. Al igual que la cronología del sitio anterior, esta situación indica la potencialidad de las muestras obtenidas en la Pampa del Tamarugal, debido

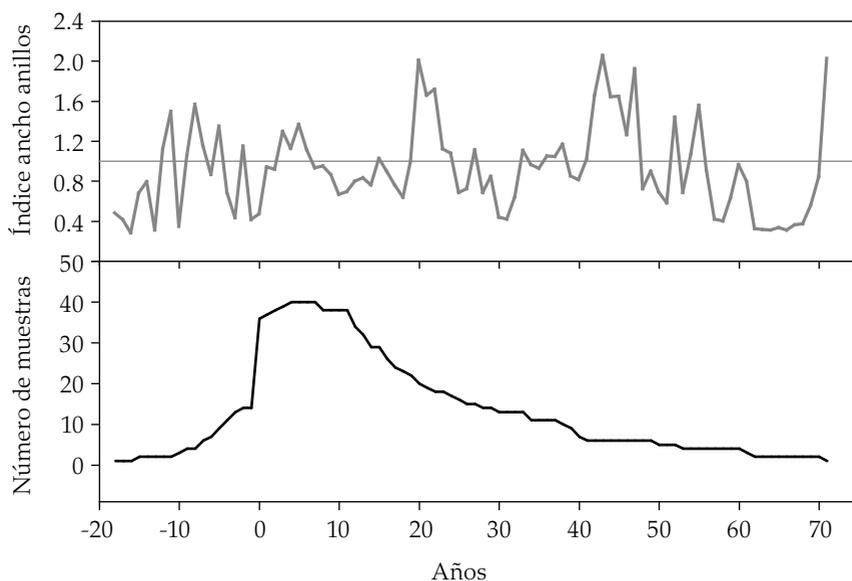


Figura 8. Variación de índices de anillos de crecimiento para Ramaditas en la versión Estándar con el número de muestras incluidas en la cronología. La línea es un filtro exponencial (Rosenbluth *et al.* 1997).

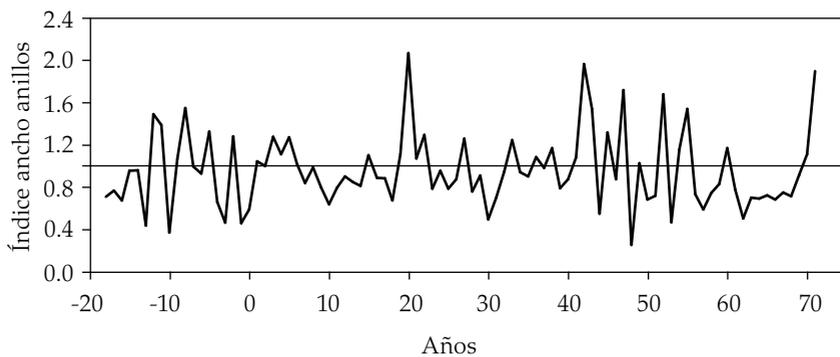


Figura 9. Variación de índices de anillos de crecimiento para Ramaditas en la versión Residual con el número de muestras incluidas en la cronología. La línea es un filtro exponencial (Rosenbluth *et al.* 1997).

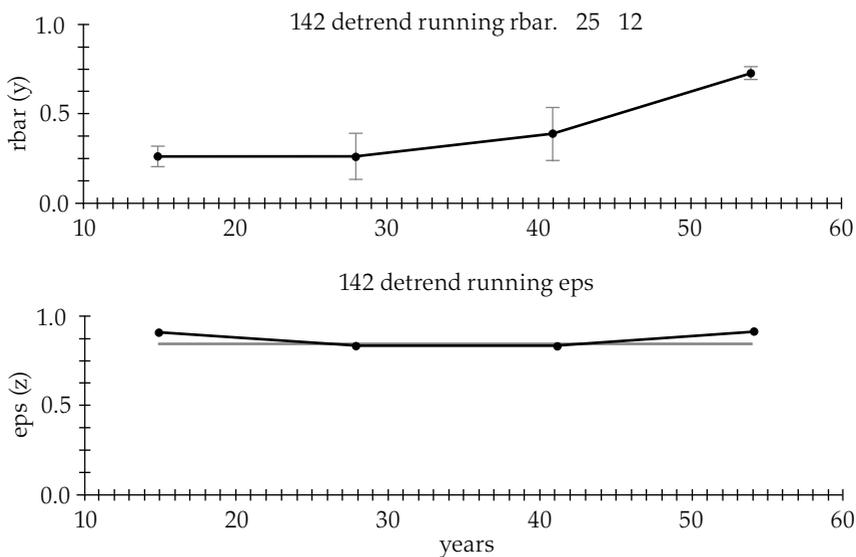


Figura 10. Estadígrafos Rbar con ventana móvil de 25 años traslapados en 12 años y EPS para la cronología de Ramaditas.

a que presentan variaciones interanuales en el crecimiento de los anillos.

La Figura 12 muestra la cronología ESTÁNDAR, donde destacan cuatro períodos de crecimiento bien marcados, siendo el primero por sobre la media entre los años 1932 hasta 1950 y uno de corta duración entre los años 1985 y 1990. Los períodos de crecimiento por debajo de la media se presentan entre los años 1955 y 1985 y desde el 2000 hasta el presente.

En la misma Figura 12 se muestra que el mayor número de muestras colectadas se

concentra entre los años 1960 y 2000 con una media de 15 muestras. Esta situación indica que la cronología es más confiable en ese período debido al mayor número de muestras que participan, lo que disminuye el error y aumenta la confiabilidad de la cronología.

Al igual que la figura anterior, la cronología RESIDUAL (Figura 13), presenta periodos de crecimiento por sobre y bajo la media, mostrando una mayor variabilidad de alta frecuencia interanual, lo que permitirá la utilización en futuras reconstrucciones climáticas.

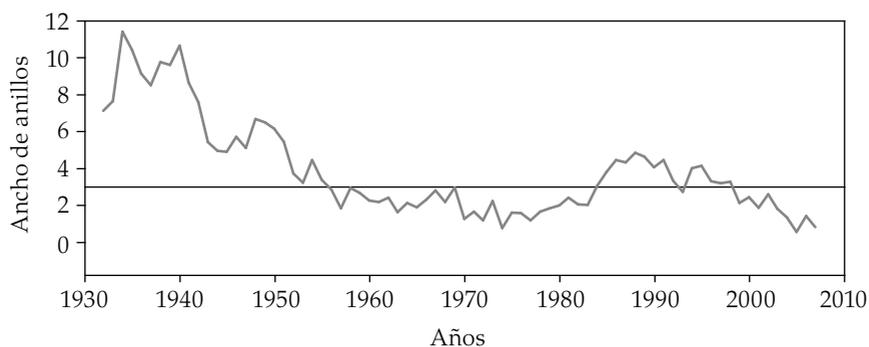


Figura 11. Valor medio del total de las mediciones para las muestras colectadas en el sitio Pampa del Tamarugal.

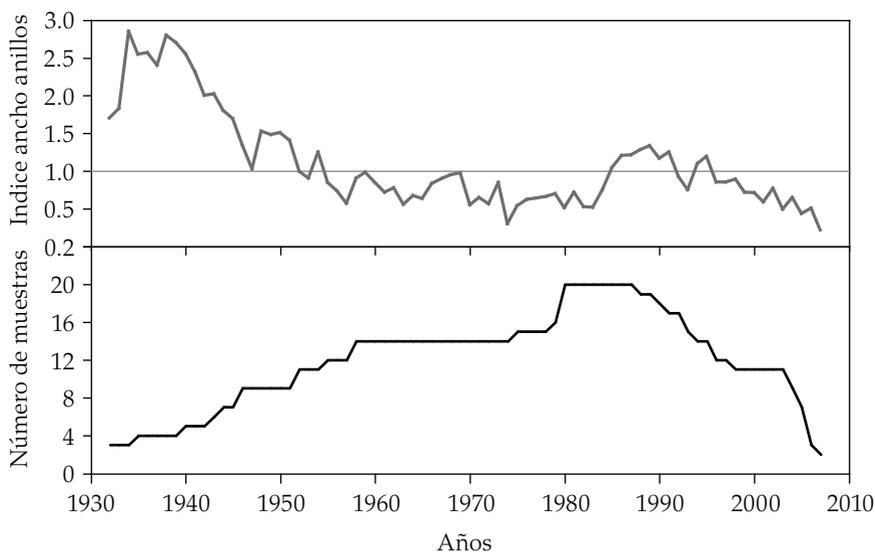


Figura 12. Variación de índices de anillos de crecimiento para Pampa del Tamarugal en la versión ESTÁNDAR con el número de muestras incluidas en la cronología. La línea es un filtro exponencial (Rosenbluth *et al.* 1997).

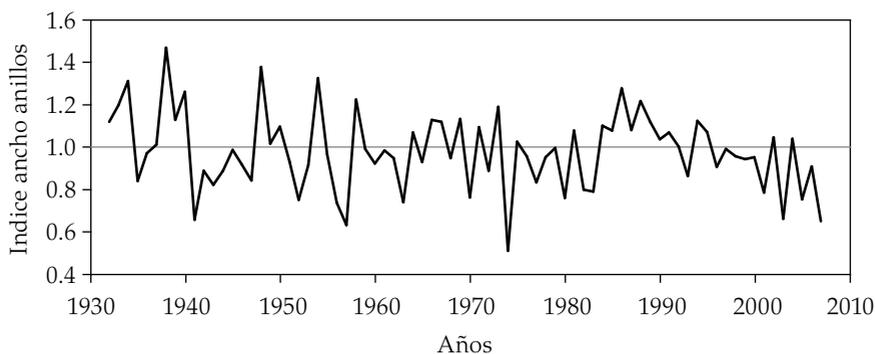


Figura 13. Variación de índices de anillos de crecimiento para Pampa del Tamarugal en la versión RESIDUAL con el número de muestras incluidas en la cronología. La línea es un filtro exponencial (Rosenbluth *et al.* 1997).

En la Figura 14 se muestran los cambios en el estadístico Rbar, utilizando ventanas de 25 años con traslajos en 12 años. Destaca el estadístico EPS en la cronología Pampa del Tamarugal con valores en general muy cercanos al umbral fijado por literatura (0,85) (Wigley *et al.* 1986; Briffa 1995). Esto indica que hay una señal común adecuada, sobre todo al final de la cronología, donde el valor está por sobre la media de las muestras colectadas en la Pampa del Tamarugal.

Conclusiones

Presentamos aquí resultados de las primeras cronologías de ancho de anillos en *Prosopis tamarugo* Phil y *Prosopis alba* Griseb, realizadas en la Pampa del Tamarugal, Chile, utilizando muestras de sitios arqueológicos como de árboles vivos y muertos. Ambas cronologías destacan por ser las primeras en su tipo en Chile, y a la vez, por dar el primer paso en los estudios dendrocronológicos de sitios arqueológicos en el desierto de Chile.

Las rigurosas condiciones del medio ambiente donde crece *P. tamarugo* y *P. alba* permiten que la variabilidad interanual se vea reflejada en el crecimiento de los anillos de los árboles, haciendo de la Pampa del Tamarugal una fuente importante de registros dendrocronológicos y dendroarqueológicos. Por otra parte, la calidad de los estadígrafos obtenidos en las dos cronologías desarrolladas indica claramente que las cronologías de *P. tamarugo* y *P. alba*, tanto en su versión arqueológica como contemporánea, son adecuadas para ser utilizadas en futuras reconstrucciones climáticas y ambientales del pasado.

Los estadísticos Rbar y EPS señalan que hay una señal común adecuada, salvo en un período en la cronología Ramaditas y dos en la cronología Pampa del Tamarugal. La disminución de la relación se debe al bajo número de muestras que alcanzaron a ser cofechadas como también al bajo número de muestras colectadas, lo cual no afecta la calidad final de las cronologías.

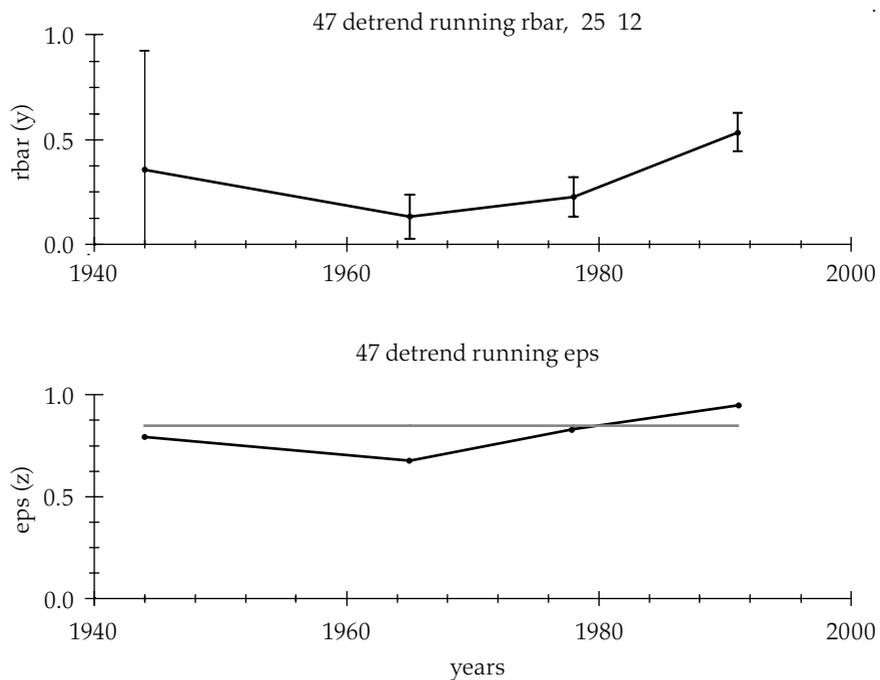


Figura 14. Estadígrafos Rbar con ventana móvil de 25 años traslapados en 12 años y EPS para la cronología de Pampa del Tamarugal.

Restos de troncos enterrados y semifosilizados encontrados en lugares donde no hay bosque actualmente permiten asumir que la extensión cubierta en el pasado era muy superior, lo que permitiría ampliar el área de estudio, como la posibilidad de encontrar especímenes más viejos y con mayor número de anillos.

En la actualidad la masa forestal se encuentra confinada a unos pocos miles de hectáreas en terrenos privados y del Estado, cubriendo una superficie aproximada de 28.214 hectáreas que incluye la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal, lo que permite la búsqueda de material vivo o muerto.

En América del Sur, y más específicamente el Desierto de Atacama, las especies del género *Prosopis*, *Ephedra* y *Polylepis* constituyen las únicas especies leñosas con posibilidades ciertas en futuros estudios dendroecológicos. (Boninsegna 1992; Morales *et al.*, 2001, 2004; Argollo *et al.*, 2004; Moya 2006; Christie *et al.* 2009). En efecto, uno de nosotros (Moya 2006) ha obtenido dos secuencias de 242 y 536 años respectivamente, tomando como base los sitios de Nasahuento y Guallatire en el altiplano tarapaqueño, a partir de muestras de *Polylepis tarapacana* Phil. Los estadígrafos resultantes de ambas cronologías señalan que ambas son adecuadas para ser utilizadas con fines dendroclimatológicos. Las funciones de correlación de ambos sitios también muestran que el crecimiento estuvo regulado por precipitación, señalando una correspondencia positiva con el verano previo, en donde los resultados obtenidos son similares a aquellos obtenidos en sitios estudiados en Bolivia y Argentina, especialmente en Tunupa, Caquella y Soniquera (Argollo *et al.* 2004) y en Cerro Granada en el Noroeste de Argentina (Morales *et al.* 2004; Soliz *et al.* 2009), lugar este último donde la secuencia se extendió hasta el año 1297 de la era. Consecuentemente, *Polylepis tarapacana* está bajo la influencia de una señal macroclimática común para el área en estudio y que de acuerdo a los resultados que se reportan en este artículo nos permiten proponer una vinculación efectiva entre el altiplano y el área del desierto en relación a las condiciones climáticas en el pasado,

demostrando una dinámica similar en ambas regiones posiblemente a través de un largo periodo.

Los recursos ambientales pueden haber estado sujetos a las condiciones más húmedas de las tierras altas que habrían producido descargas hacia la planicie inclinada donde predomina la magnitud del desierto. Nester *et al.* (2007) destacan las descargas de corrientes de agua perenne en la Quebrada de Chacarilla donde la descarga mayor pudo haberse producido entre 16380 y 13740 cal. año BP con una descarga menor ocurrida entre 1070 y 700 cal año BP.

El subsecuente periodo de sequedad que se observa en el altiplano probablemente precipitó el abandono de la aldea de Ramaditas y posiblemente de otras aldeas de periodo similar. Esta hipótesis que fue sugerida por el modelo presentado por Bryson (2005) para el caso de Ramaditas es congruente con aquel sugerido por Messerli *et al.* (2000). Sin embargo, la impronta dejada en las anillas de los árboles puede tener al menos dos causas: 1) natural, relacionada con eventos de la Oscilación del Sur-El Niño (ENSO) u otras condiciones climáticas y 2) debido a acción humana. Es interesante tener en cuenta el punto de vista de Dean y Doyel (2006) quienes señalan que tanto procesos naturales como culturales están estructurados sobre la base de variaciones a través de un largo tiempo, de manera que el proceso de adaptabilidad del comportamiento humano así como la variabilidad ambiental debe ser estudiado a través de un periodo largo de tiempo. De esta forma, la interacción hombre-medio ambiente es crucial como objetivo de gran alcance en nuestra propuesta. Desde este punto de vista nos interesa despejar incógnitas tales como ¿qué pudo haber causado la desaparición de las formaciones boscosas de *Prosopis*? Si existió un cambio importante de las condiciones ambientales de la Pampa del Tamarugal, y por extensión al Desierto de Atacama, ¿cuál pudo haber sido la causa de estos cambios? y ¿cuál el impacto humano sobre el medio ambiente o viceversa?

Este dilema es contrastado por algunos rasgos interesantes que exhibe la ocupación prehispánica de Ramaditas, a saber:

- Presencia de extensos campos de cultivo,
- Red de canales de irrigación que alimentaban los campos de cultivo,
- Conjunto de obras hidráulicas que incluye pozos artesianos, grandes acequias y empozamientos y reservorios,
- Presencia de formaciones boscosas fósiles en los alrededores del sitio,
- Restos de plantas recuperados a través de polen, restos macrobotánicos, coprolitos y fitolitos (Thompson 2005; Baied 2005; Cummings *et al.* 2005)
- Restos de semillas machacadas de tamarugo en piedras de moler asociadas al nivel más temprano.

Las evidencias señaladas sobre el recurso agua en Ramaditas revelan una situación de bastante complejidad donde el registro arqueobotánico pone de manifiesto que las condiciones ecológicas fueron alteradas.

Una cuestión adicional la constituye la posible conexión con fenómenos ENSO en especial en relación a las condiciones climáticas de áreas del desierto durante el Holoceno Medio, tópico sobre el que hay amplia discusión y diversidad de hipótesis (Betancourt *et al.* 2000; Grosjean 2001; Rech *et al.* 2002; Quade *et al.* 2001; Quade *et al.* 2008; Williams *et al.* 2008; Rivadeneira *et al.* 2009).

Con los resultados obtenidos hasta el momento se puede decir categóricamente que tanto las muestras de tamarugo como de algarrobo cofechan entre ellas y pueden ser utilizadas para futuras reconstrucciones climáticas, situación que permitirá el estudio de las variables medioambientales que marcaron el clima en el pasado, con lo cual se podrá comprender el uso del desierto más árido del mundo por un puñado de hombres y mujeres que hace miles de años lo usó como su hogar y medio de subsistencia.

Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias al aporte de las siguientes instituciones: National

Geographic Society (Grant 8373-07), The Herron Foundation y Museum of the Red River, Idabel OK, Beloit College de Wisconsin, Laboratorio de Dendrocronología Universidad Austral de Chile, Beta Analytic, Inc., Consejo de Monumentos Nacionales de Chile, Gobierno Regional de Tarapacá, Provincia del Tamarugal, en especial de su Gobernadora señora Gabriela Hip Hidalgo y personal, Corporación Nacional Forestal Región de Tarapacá, en especial a su director don Franco Delucchi Iglesias, jefe de planta Reserva Refresco señor Raúl Caqueo y los funcionarios señores Miguel Valdebenito, Hernán Rojas, Sandro Maldonado y Homero Altamirano, por su experiencia y conocimiento acerca de los nobles tamarugos. La Universidad Arturo Prat de Iquique, Estación Experimental de Canchones de la Universidad Arturo Prat, Departamento de Agricultura del Desierto de la Universidad Arturo Prat fueron instrumentales en el logro de esta investigación. A don Luis Flores Cabezas y Reinaldo Berrios de Iquique Televisión, y especialmente a nuestros amigos Ivor Ostojic Peric y Pablo Cañarte González.

Referencias bibliográficas

ARGOLLO, J., C. SOLIZ y R. VILLALBA (2004) Potencialidad dendrocronológica de *Polylepis tarapacana* en los Andes Centrales de Bolivia, *Ecología en Bolivia*, 39(1): 5-24.

BAIED, C. (2005) Disponibilidad Hídrica y Movilidad en Ecosistemas de Puna Durante el Arcaico-Formativo Temprano en los Andes Centro Sur. En Rivera, M.A., ed. *Arqueología del Desierto de Atacama, La Etapa Formativa en el Área de Ramaditas/ Guatacondo* Universidad Bolivariana/Lom Ediciones, pp. 63-71, Santiago.

BERESFORD-JONES, D, S. ARCE, O.Q. WHALEY y A.J. CHEPSTOW-LUSTY (2009) The Role of *Prosopis* in Ecological and Landscape Change in the Samaca Basin, Lower Ica Valley, South Coast Peru from the Early Horizon to the Late Intermediate Period, *Latin American Antiquity* 20: 303-332.

BETANCOURT, J.L., C. LATORRE, J.A. RECH, J. QUADE y K.A. RYLANDER (2000) A 22,000-Year Record of Moonsonal Precipitation from Northern Chile's Atacama Desert, *Science* 289: 1542-1546.

- BONINSEGNA, J. (1992) South American dendroclimatological records, *Climate since A. D. 1500*, editado por R. S. Bradley y P. D. Jones, Routledge, London, 446-462.
- BRADLEY, R. S. y P. D. JONES, eds. (1992) Climate Since A. D. 1500: Introduction. *Climate Since A. D. 1500* pp. 1-16.
- BRIFFA, K. R. (1995) Interpreting high-resolution proxy climate data: the example of dendroclimatology. (Eds H. von Storch and A. Navarra). *Analysis of climate variability, applications of statistical techniques*, pp. 77-94 Springer, Berlin.
- BRYSON, R. (2005) Implications of Macrophysical Paleoclimatic Models for Irrigation Agriculture at Ramaditas, Northern Chile, En Rivera, M.A., ed. *Arqueología del Desierto de Atacama, La Etapa Formativa en el Area de Ramaditas/Guatacondo* Universidad Bolivariana/Lom Ediciones, pp. 37-62, Santiago.
- CHRISTIE, DUNCAN, A. LARA, J. BARICHIVICH, R. VILLALBA, M. MORALES y E. CUQ (2009) El Niño-Southern Oscillation Signal in the world's highest-elevation tree-ring chronologies from the Altiplano, Central Andes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281:309-319.
- COOK, E. R. (1985). *A time series analysis: Approach to tree-ring standardization*. Ph. D. Dissertation. Tucson, USA, University of Arizona 171 pp.
- DEAN, J. S. y D.E. DOYEL (2006) Culture, Environment, and Adaptation: Perspectives from the Ancient Southwest, Environmental Change and Human Adaptation in the Ancient American Southwest, Dean y Doyel eds. pp. 1-9 University of Utah Press.
- DI CASTRI, F.; E. HAJEK. (1976) *Bioclimatología de Chile*. Santiago, Vicerrectoría Académica de la Universidad Católica de Chile. 124 p.
- CUMMINGS, L. S., NEPSTAD-THORBERRY y C., K. PUSEMAN (2005) Restos Paleofecales del Sitio de Ramaditas, Norte de Chile: Aspectos sobre Dieta y Salud en el Formativo Medio y Tardío. En Rivera, M.A., ed. *Arqueología del Desierto de Atacama, La Etapa Formativa en el Area de Ramaditas/Guatacondo* Universidad Bolivariana/Lom Ediciones, pp. 195-210, Santiago.
- FFOLIOTT, P. y THAMES, J. (1983) *Manual sobre taxonomía de Prosopis en México, Perú y Chile*. FAO, Roma. 31 p.
- FRITTS, H. C. (1976) *Tree Rings and Climate*. London, Academic Press. 567 p.
- FUENZALIDA, H. (1971) *Climatología de Chile*. Publicación interna de la sección de Meteorología. Departamento de Geofísica y Geodesia, Universidad de Chile. 73 p.
- GAJARDO, R. (1993) *La vegetación natural de Chile*. Clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria, Santiago. 165 p.
- GRAFFAM, G, M.A. RIVERA y A. CAREVIC (1994) Copper Smelting in the Atacama: Ancient Metallurgy at the Ramaditas Site, Northern Chile. In *Quest of Mineral Wealth. Aboriginal and Colonial Mining and Metallurgy in Spanish America* (Eds. A.K. Craig y R.C. West), *Geoscience and Man* 33, 75-92.
- GRAFFAM, G, M.A. RIVERA y A. CAREVIC (1996) Ancient Metallurgy in the Atacama: Evidence for Copper Smelting during Chile's Early Ceramic Period. *Latin American Antiquity* 7: 101-113.
- GRAFFAM, G., A. CAREVIC y M. A. RIVERA (1997) Evidencias metalúrgicas de fundición de cobre en el sitio Formativo Tardío de Ramaditas. Quebrada de Guatacondo, Provincia de Iquique, Chile. *Estudios Atacameños* 12: 53-68.
- GROSJEAN, M. (2001) Mid-Holocene Climate in the South-Central Andes: Humid or Dry? *Science* 292: 2391a.
- HABIT, M., D. CONTRERAS y R. GONZÁLEZ R. (1981) *Prosopis tamarugo Arbusto forrajero para zonas áridas*. Estudio FAO: Producción y Protección Vegetal N° 25. 143 p.
- HOLMES, R. (1983) Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurements. *Tree-ring Bulletin* 44: 69-75.
- IREN (1976) *Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales Inventario de Recursos Naturales por Método de Percepción del Satélite LANDSAT*. I Región.
- MESSERLI, B., M. GROSJEAN, T. HOFER, L. NÚÑEZ y C. PFISTER (2000) From nature-dominated to human-dominated environmental changes, *Quaternary Science Reviews* 19: 459-479.

- MORALES, M., R. VILLALBA, P. VILLAGRA, J.A. BONINSEGNA, A. RIPALTA y L. PAOLINI (2001) Potencialidad de *Prosopis ferox* Griseb (Leguminosae, subfamilia: Mimosoideae) para estudios dendrocronológicos en los desiertos subtropicales de alta montaña. *Revista Chilena de Historia Natural*, 74: 865-872.
- MOYA, JORGE (2006) *Desarrollo de las primeras cronologías de ancho de anillas de Quenoa (Polylepis tarapacana Phil.) en el Altiplano del Norte de Chile*, Tesis de Master en Ciencias, Mención Recursos Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- NESTER, P., E. GAYO, C. LATORRE, T. E. JORDAN y N. BLANCO (2007) Perennial stream discharge in the hyperarid Atacama Desert of northern Chile during the latest Pleistocene, *Proceedings National Academy of Sciences* 104: 19724-19729.
- QUADE, J., J. RECH y J. BETANCOURT (2001) Mid-Holocene Climate in the South-Central Andes: Humid or Dry? Response, *Science* 292: 2391
- QUADE, J., J.A. RECH, J.L. BETANCOURT, C. LATORRE, B. QUADE, K.A. RYLANDER y T. FISHER (2008) Paleowetlands and regional climate change in the central Atacama Desert, northern Chile, *Quaternary Research* 69: 343-360.
- RECH, J.A., J. QUADE y J.L. BETANCOURT (2002) Late Quaternary paleohydrology of the central Atacama Desert, Chile (22-24°S), *Geological Society of America Bulletin* 114: 334-348.
- RIVADENEIRA, M., C.M. SANTORO y P.A. MARQUET (2009) Reconstructing the history of human impacts on coastal biodiversity in Chile: constraints and opportunities, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* www.interscience.wiley.com DOI: 10.1002/aqc www.
- RIVERA, M.A. (2002) Historias del Desierto. *Arqueología del Norte de Chile*. Editorial del Norte, La Serena. 238 p.
- RIVERA, M.A. (2005) *Arqueología del Desierto de Atacama. La Etapa Formativa en el Área de Ramaditas/Guatacondo*. Editorial Lom/Universidad Bolivariana, Santiago. 299 p.
- RIVERA, M.A. (2006) Prehistoric Maize from Northern Chile. An Evaluation of the Evidence. *Histories of Maize* (Eds. J. Staller, R. Tykot y B. Benz), Elsevier, Academic Press, Burlington, San Diego, London, pp. 403-413
- RIVERA, M.A., D.E. SHEA, A. CAREVIC y G. GRAFFAM (1995/96) En torno a los orígenes de las sociedades complejas andinas: Excavaciones en Ramaditas, una aldea formativa del Desierto de Atacama, Chile. *Diálogo Andino* 14/15, 205-239.
- ROBINSON, W. J. y R. EVANS. (1980) A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-ring Bulletin*, 40: 59-63.
- ROSENBLÜTH, B.; H. A. FUENZALIDA y P. ACEITUNO (1997) Recent temperature variations in Southern South America. *International Journal of Climatology*, 17: 67-85.
- SCHULMAN, E. (1956) *Dendroclimatic changes in semiarid America*. University of Arizona Press, Tucson 142 pp.
- SHEA, D.E. y M.A. RIVERA (2004) Resource Acquisition in the Atacama: at the periphery of pre-Tiwanaku. *Tiwanaku, Aproximaciones a sus contextos históricos y sociales* (Eds. M.A. Rivera y A.L. Kolata) Editorial Lom/Universidad Bolivariana, Santiago. pp. 127-147.
- SOLIZ, CLAUDIA, R. VILLALBA, J. ARGOLLO, M. MORALES, D. CHRISTIE, J. MOYA y J. PACAJES (2009) Spatio-temporal variations in *Polylepis tarapacana* growth across the Bolivian Altiplano during the 20th century, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 296-308.
- STAHLE, D.; J. VILLANUEVA; M. K. CLEAVELAND; M. D. THERRELL; G. J. PAULL; B. T. BURNS; W. SALINAS; H. SUZAN y P. Z. FULE. (2000) Recent tree-ring research in México. *Dendrocronología en América Latina* (Ed. F.A. Roig). EDIUNC, Mendoza pp. 285-306.
- SUDZUKI, F. (1969) *Absorción foliar de humedad atmosférica en tamarugo*. Boletín Técnico No 30. Estación Experimental Agronómica. Universidad de Chile. 23 p.
- STOKES, M. A. y T. L. SMILEY. (1968) *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- THOMPSON, R.G. (2005) Phytolith Analysis of Food Residues from Coprolites and a Pottery Sherd Recovered at Ramaditas, Chile. En Rivera,

M.A., ed. *Arqueología del Desierto de Atacama, La Etapa Formativa en el Area de Ramaditas/Guatacondo* Universidad Bolivariana/Lom Ediciones, pp. 211-230, Santiago.

WIGLEY, T. M. L., K. L. BRIFFA y P. D. JONES. (1986) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and

hydrometeorology. *Journal of Common Applied Meteorology* 23: 201-213.

WILLIAMS, ALAN, C.M. SANTORO, M.A. SMITH, C. LATORRE (2008) The impact of ENSO in the Atacama Desert and Australian Zone. *Exploratory Time-Series Analysis of Archaeological Records, Chungara* 40: 245-259.