



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

Paleoclimatología del Noroeste Mexicano

T E S I S

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

**Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación Ecología)**

Presenta

Sara Cecilia Díaz Castro

Comité Tutorial y Revisor de Tesis

Directora: Dra. Laura L. Arriaga Cabrera.	Consejo Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), México, D.F.
Co-tutor: Dr. Sergio Hernández Vazquez.	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR). La Paz, México.
Co-Tutor: Dr. Daniel Lluch Belda.	Centro Interdisciplinario de Ciencias del Mar. (CICIMAR). La Paz, México.
Co-Tutor: Dr. Thomas W. Swetnam.	Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona. Tucson, USA
Co-Tutor: Dr. Ramzi Touchan.	Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona. Tucson, USA

Miembros del Jurado de Examen

Dr. Sergio Hernández Vazquez. Investigador.	CIBNOR. La Paz, México.
Dra. Laura L. Arriaga Cabrera.	CONABIO. México, D.F.
Dr. Daniel Lluch Belda.	CICIMAR. La Paz, México
Dr. Ramzi Touchan.	Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona. Tucson, USA.
Dr. José Villanueva.	INIFAP de Torreón, Coahuila.
Dr. Daniel Bernardo Lluch Cota	CIBNOR. La Paz, México.

Agradecimientos

El presente trabajo se realizó gracias al apoyo brindado por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR), a través del Programa de Posgrado y del Programa de formación de Recursos Humanos. A sus autoridades agradezco la oportunidad de tener una superación académica. En especial al Dr. Sergio Hernández por su apoyo durante su gestión como Director del Programa de Posgrado.

El patrocinio para la realización de los estudios e investigación del doctorado también fue otorgada por el CONACYT (beca de doctorado exp. 94965), Comisión México-Estados Unidos para el Intercambio Educativo y Cultural Fulbright- García Robles (beca de tesis doctoral No. 22731) y a la Academia Mexicana de Ciencias (beca del programa Estancias de Verano en E.E.U.U. para Investigadores Jóvenes). A todas estas instituciones mi más sincero agradecimiento.

A mi directora de tesis la Dra. Laura Arriaga agradezco su paciencia y enriquecedores comentarios a este trabajo. Agradezco también a cada uno de los miembros de mi Comité Tutorial el apoyo y consejos que me brindaron.

Al Laboratory of Tree-Ring Research de la Universidad de Arizona en Tucson, por la formación en el campo de la Dendrocronología y en especial al Dr. Ramzy Touchan por el seguimiento estrecho que hizo a mis avances y por su amistad.

Al Dr. David W. Stahle y su equipo de trabajo (Matthew D. Therrell y Dr. Malcolm K. Cleaveland) del Tree-Ring Laboratory de la Universidad de Arkansas en Fayetteville, por compartir conmigo su experiencia y amistad.

Mi agradecimiento también es para el personal del CIBNOR que me apoyó con su invaluable ayuda en el trabajo de campo: Sergio Alvarez, Reymundo Domínguez, Franco Cota, Amado Cota, Miguel Domínguez, Avelino Cota e Israel Guerrero; y con los trámites del Posgrado: Osvelia, Lety, Horacio y Lupita.

A Ira Fogel por su trabajo editorial y sugerencias en la versión en Inglés de este documento.

Deseo también manifestar mi agradecimiento al invaluable apoyo de mis amigos Sergio Alvarez y Cesar Salinas, gracias también por sus comentarios y sugerencias.

El llegar a este punto de mi desarrollo académico se debe en gran medida al cariño y apoyo que mi marido me brindó, sobre todo en los momentos difíciles de decisión entre abandonar esta empresa, o separarme de la familia nuevamente para realizar otra estancia en Tucson.

Finalmente a mis "kikiss" Lalín y Sayis; a mis padres Ana María y Jesús; y a mis hermanos: Rosy, Blanca, Lulú, Chela, Por, Fátý, Ana y Pily, a todos ellos "smuak" les agradezco su confianza.

Contenido

Presentación	i
Resumen	ii
Abstract	iv
1. Introducción General	1
1.1. Importancia del clima	1
1.2. Paleoclimatología	2
1.2.1. Registros Proxy	3
1.2.2. Dendroclimatología	6
1.3. Antecedentes de estudios paleoclimáticos	8
1.3.1. Pleistoceno	9
1.3.2. Holoceno	11
1.3.3. Presente	12
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo general	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. Características de la Región Noroeste de México	16
4. Reconstrucción de la precipitación pasada en Baja California Sur	21
5. Reconstrucción de la precipitación de invierno-primavera para Chihuahua: 1644-1992, y su relación con el ENSO	40
6. Consideraciones finales	57
6.1 Discusión de la tesis	57
6.2 Implicaciones para la administración de recursos naturales	61
6.3 Conclusiones	62
6.4 Perspectivas de investigación a futuro	64
7. Referencias	66

Presentación

El tema central de este trabajo es el estudio paleoclimático del Noroeste de México, es por eso que en los primeros capítulos se mencionan las generalidades del clima y se explica en qué consiste la paleoclimatología y cuáles son las técnicas más utilizadas para su estudio. Se presenta un panorama detallado sobre las características climáticas de la región y de los factores que determinan su clima actual. Dentro de este marco de referencia se hace una recopilación y análisis de los estudios paleoclimáticos que se han realizado en la región Noroeste de México y que contienen información a partir del Pleistoceno tardío, hace aproximadamente 1.8 millones de años, y así ubicar dentro de la información paleoclimática a los estudios dendrocronológicos. De igual forma, se hace una revisión general de los fundamentos de la dendrocronología, a partir de los cuales surgieron las principales hipótesis y preguntas teóricas que se abordan en los artículos.

La presente tesis está basada en dos artículos (Capítulos 4 y 5) aceptados para su publicación en revistas científicas internacionales e indexadas. En estos se presenta una reconstrucción de la precipitación en los Estados de Baja California Sur, Sinaloa, Sonora y la región de Chihuahua.

- Díaz, S.C., R. Touchan, and T.W. Swetnam . A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, México. *International Journal of Climatology*. 21(8): 107-1019.
- Díaz, S.C., D. Stahle, M. Therrel, and M. Cleaveland. Chihuahuan rainfall reconstructed from tree-rings (1640-1992). *Climate Research*.

En el capítulo 6 se discuten los principales resultados obtenidos en esta investigación, así como las perspectivas de investigación a futuro y finalmente en el capítulo 7 se presenta la bibliografía citada.

Resumen

La mayoría de los registros climáticos del noroeste de México inician en 1940 o 1960, por lo que la información sobre la variabilidad climática está limitada solamente a unas cuantas décadas. Para entender mejor la variabilidad climática de la región, se recopilaron y analizaron los estudios paleoclimáticos realizados en la región, que presentaran datos desde el Pleistoceno tardío hasta el presente. Ya que la dendrocronología brinda información paleoclimática de alta frecuencia (anual o estacional), se desarrolló un análisis dendrocronológico del pino piñonero *Pinus lagunae* de la Sierra de La Laguna, a partir del cual se obtiene una serie que abarca un total de 165 años (de 1840 a 1997). Con ella se reconstruyó la precipitación de septiembre a julio ($r = 0.71$, $p < 0.0001$, $n = 56$). En la serie de precipitación reconstruida se aprecia la influencia de los eventos ENSO, y es precisamente en 1983, cuando sucede uno de los eventos El Niño más fuertes, el año más húmedo de la reconstrucción. Cuatro de los años más húmedos ocurrieron en asociación con ese evento (1905, 1912, 1919 y 1983). Por su parte, el 71% de los eventos de La Niña están relacionados con años con precipitaciones menores al promedio. En la serie reconstruida se aprecia un periodo de sequía prolongada de 1939 a 1958, lo cual podría suponer que la gran sequía que se dio en el suroeste de Estados Unidos inició antes en Baja California Sur. Los anillos de crecimiento de *P. lagunae* se correlacionaron fuertemente con la precipitación invernal de Sonora, Sinaloa y gran parte de Baja California Sur por lo que la reconstrucción nos indica también la variabilidad de su precipitación invernal. Los datos climáticos del norte de la península de Baja California, zona que presenta un clima de tipo mediterráneo, no se correlacionaron con el resto de la región.

En la reconstrucción de la precipitación de invierno-primavera desde 1647 a 1992 de la región de Chihuahua, se utilizaron 6 dendrocronologías de madera temprana del abeto *Pseudotsuga menziesii*. Primero se calibraron datos de precipitación adquiridos de la base de datos Hulme de 1949 a 1992 con los datos de las dendrocronologías, obteniéndose un modelo lineal utilizado para verificar la precipitación de 1901 a 1948. Este proceso mostró una fuerte correlación entre los datos de precipitación calculados con las dendrocronologías y los observados en la base de datos ($r = 0.74$, $p < 0.01$). Por lo que el modelo pudo utilizarse para reconstruir la precipitación de invierno-primavera de Chihuahua. En la serie reconstruida, los 5 años más secos en orden de severidad correspondieron a 1974, 1954, 1742, 1980 y 1820, siendo el periodo más largo de sequía en la serie de 346 años de 1948 a 1956. La frecuencia dominante en la serie reconstruida fue de 4 años, cayendo en la banda de frecuencia de los eventos ENSO, además que se correlacionó significativamente con el Índice de Lluvias Tropicales que está relacionado con el ENSO ($r = 0.58$, $p < 0.001$). Se observan diferencias de influencia de las teleconexiones del ENSO en el noroeste de México ya que cuando se relacionó el índice del ENSO con la serie reconstruida en periodos de 20 años la correlación varió de $r = 0.68$ a $r = 0.43$.

A pesar de que las series obtenidas de la Sierra de La Laguna y de Chihuahua mostraron la influencia de los fenómenos del ENSO, la correlación entre ellas, aunque significativa es baja, ya que son afectadas por diferentes factores climáticos. Debido al ambiente árido de la región, los eventos de La Niña resultan ser importantes ya que están relacionados con sequías, las cuales causan más daños en ambientes áridos. Los estudios dendrocronológicos son de utilidad para reconstruir no sólo el clima, sino diversos procesos ecológicos, por lo que su aplicación debería extenderse mucho más en México, ya que es un país rico en recursos forestales y con un gran potencial para investigación. La reconstrucción climática realizada en la región noroeste de México es importante también para entender diversos fenómenos históricos y sociales, y precisamente por éstos últimos será importante utilizar la información generada en esta investigación, como base para la elaboración de modelos de predicción climática confiables.

Esta investigación contribuye de alguna manera para ir complementando el rompecabezas mundial de información paleoclimática, donde los trópicos han estado muy pobremente representados, así también los Modelos Globales de Circulación podrán ser ajustados con las particularidades de cada región.

Abstract

The climatic variability information is limited to few decades in the northwestern Mexico because instrumental climate records begin in 1940s or 1960s. The paleoclimatic studies with information since Late Pleistocene done in this region were compiled and analyzed to understand its climatic variability. Because the dendroclimatology give us high frequency paleoclimatic information, we did a dendroclimatology analysis of pinyon pine *Pinus lagunae* of Sierra de La Laguna from which we got a series for the span AD 1862 to 1996. We reconstructed the September-July precipitation ($r = 0.71$, $p < 0.0001$, $n = 56$) and analyzed its relationship with El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events. The reconstructed precipitation shows that 1983, one of the strongest El Niño events of the twentieth century, is the wettest. El Niño events during the 20th century are associated with above-normal precipitation, whereas four of the most extreme wet years occurred in association with these warm events (1905, 1912, 1919, and 1983). La Niña events are characterized by below-normal precipitation and the reconstruction indicates an epic drought from 1939 to 1958. Tree-ring growth of *Pinus lagunae* is most strongly correlated with winter precipitation in Sonora, Sinaloa, and southern Baja California Sur. Precipitation data from meteorological stations in northern Baja California do not correlate well with the tree-ring chronology because this zone has a Mediterranean climate which differs from the rest of northwest Mexico.

The reconstruction of winter-spring precipitation from 1647-1992 for Chihuahua, Mexico was done using six earlywood width chronologies of Douglas-fir. The five driest years in the reconstructed precipitation record were 1974, 1954, 1742, 1980, and 1820 in order of severity, and the longest dry period in the 346-year record lasted about 17 years (1948-1964) during the severe 1950's drought that also affected the southwestern United States. The reconstructed precipitation record has a statistically significant 4-year spectral peak in the ENSO frequency band and is significantly correlated with indices of ENSO (Tropical Rainfall Index, $r = 0.58$; $P = 0.001$). The correlation between the ENSO and Chihuahuan reconstructed precipitation varied in strength when computed for non-overlapping 18 year sub-periods (ranging from $r = 0.43$ to $r = 0.68$), which may reflect changes in the ENSO teleconnection to climate in northern Mexico.

Even when both obtained series from Baja California Sur and Chihuahua show the ENSO influence, the correlation was significant but low, because different factors influence them. La Niña events are important in this arid region because are related with drought periods. The analysis of dendrochronologies from Baja California, Sonora, and Durango let us get a better understanding of the length in space and time of historic droughts, which are not shared with the north of the peninsula of Baja California because has different climate.

The Dendrochronology studies are useful not just to climate reconstruction, but also for ecologic process, that is why must be extended in Mexico, a rich country in forest resources. The Northwestern of Mexico climatic reconstruction help us to understand some historic social events, for this reason will be important

to use this regional information to integrate the paleoclimate overview, where the tropical regions are poorly represented. The regional paleoclimatic information will be useful to go adjusting the General Circulation Models and to have effective predictions.

PALEOCLIMATOLOGIA DEL NOROESTE

MEXICANO

1. Introducción General

1.1. Importancia del clima

La atmósfera de la tierra es una parte fundamental y crítica en la vida del planeta. Junto con la litosfera, la hidrosfera, y la biosfera hacen a la tierra el lugar habitable que es (Hidore y Oliver, 1993). En la zona de contacto entre las tres primeras capas es donde se encuentra la mayoría de los seres vivos. Sobre la litosfera y parte inferior de la atmósfera habita el hombre, por lo que los cambios que se efectúan en ella lo afectan directamente (García, 1978).

La climatología estudia las condiciones atmosféricas de un lugar o región durante varios años (Hidore y Oliver, 1993), siendo el clima el factor físico más importante de los que forman al medio ambiente, ya que actúa sobre los otros (vegetación natural, topografía, suelo, etc.) modificándolos (García, 1978).

La influencia del clima en el modo de vida de las sociedades humanas ha sido muy grande, por ejemplo, la agricultura continúa dependiendo del clima, determina la elección de cultivos y el lugar donde pueden cultivarse; controla la dirección de las rutas comerciales; influye en las condiciones de alimentación, tipo de vestido, costumbres, arquitectura y determina el tipo de enfermedades predominantes (Miller, 1982). De todo esto se desprende que entre mejor conocimiento se tenga de la variabilidad climática el manejo de los recursos naturales y la programación de las actividades comerciales y sociales puede ser más eficiente.

1.2. Paleoclimatología

La paleoclimatología es la ciencia encargada del estudio del clima pasado, antes de que el hombre iniciara con el registro instrumental de las medidas del tiempo atmosférico. En vez de medidas instrumentales del tiempo y del clima, la paleoclimatología utiliza registros ambientales naturales, también conocidos como registros proxy, para inferir las condiciones del clima pasado y los procesos que lo originaron.

El concepto de clima incluye el registro diario y estacional de las condiciones del tiempo (precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, etc) a lo largo de varios años, así como la frecuencia de sus eventos

extremos en una región. Sin embargo, se sabe que el clima presenta variabilidad que se observa en el transcurso de la historia de la tierra, un ejemplo notorio de ello han sido las glaciaciones (Ahrens, 1993).

Desde una perspectiva paleoclimática, el cambio del clima es normal y parte de la variabilidad natural de la tierra está relacionada con la interacción entre los sistemas atmósfera-océano-tierra, así como con los cambios en la radiación solar que llega a la tierra.

La variabilidad climática, incluyendo los cambios de frecuencia de sus eventos extremos, tales como sequías, inundaciones y tormentas, han tenido un gran impacto en las sociedades ocasionando grandes pérdidas tanto económicas como de vidas humanas (García y Escobar, 2000). En general se puede decir que las poblaciones de los países en desarrollo, como es el caso de México, son más vulnerables a los cambios climáticos, esto se debe a que su infraestructura y capital son limitados para enfrentar a estos cambios, además de ser muy dependientes de sus recursos naturales (Bohle *et al.*, 1994). Es entonces importante el estudio del cambio y variabilidad climática pasada para tener un panorama más amplio que sirva de base en la elaboración de modelos predictivos.

Investigaciones recientes muestran que cambios climáticos de gran magnitud pueden presentarse de manera abrupta en forma natural, es decir, en unos cuantos años o décadas (Loock, 2001). En la actualidad se está presentando un calentamiento climático global, ya que los registros indican que la temperatura media anual del aire superficial se elevó aproximadamente en 0.5° C en el siglo XX y los años más cálidos de los últimos 600 años ocurrieron en la década de los 1990's (Grissino-Mayer, 2001). No obstante, este calentamiento global no se ha dado de manera uniforme ni en tiempo, ni en espacio.

De manera general se ha observado que las latitudes mayores se han calentado más que las regiones tropicales (Gates, 1993). Para Canadá, por ejemplo, en los últimos 100 años la temperatura mínima (durante invierno) se ha incrementado en 1.3° C, mientras que la temperatura máxima (en verano) en sólo 0.5° C (Vincent *et al.*, 1999).

Como el cambio climático global coincide con el aumento en la emisión de gases de invernadero como el bióxido de carbono, metano, vapor de agua, etc. , por actividades humanas a una velocidad mayor a la que los procesos naturales pueden removerlos, existe en la actualidad un gran debate sobre si este cambio es causado por el hombre.

El entendimiento de los procesos naturales que determinan el clima, nos permitirá inferir si el calentamiento global es resultado del incremento de los gases de invernadero en la atmósfera, o es parte de un ciclo más largo de variabilidad climática natural. Lo anterior implica que debemos contar con registros climáticos de larga duración, ya que los cambios se perciben sólo a través de decenas, centenas o miles de años. Sin embargo, los primeros registros de temperatura medidos con termómetros apenas datan

de finales del siglo XVII y principios del XVIII en el oeste de Europa. Con el tiempo los registros climáticos en todo el mundo se han venido incrementando, pero no homogéneamente, de tal forma que, para el noroeste de México la mayoría de los registros climáticos apenas inician a mediados del siglo XX.

Como el calentamiento global es un tema de gran importancia mundial, se han elaborado diversos modelos (General Circulation Models, o Global Climate Models, GCMs), para examinar los cambios posibles provocados por la entrada antropogénica de los gases de invernadero a la atmósfera. Pero, debido a que el cambio climático no se ha dado de la misma forma en todas las regiones del mundo, resulta importante conocer qué es lo que sucede en cada una de estas, lo que servirá para realizar ajustes más finos a los modelos.

A falta de una amplia cobertura temporal y espacial de los registros de medidas hechas por el hombre, se pueden utilizar diversos registros ambientales e históricos llamados registros proxy.

1.2.1. Registros Proxy

Los registros proxy son sistemas naturales que dependen del clima, que actuaron en el pasado y que aún existen, por lo que se puede derivar información paleoclimática de ellos. Estos registros contienen una señal climática, la cual puede ser relativamente débil embebida en mucho "ruido" provocada por el efecto de otras influencias no climáticas (por ejemplo terremotos, erupciones volcánicas, avalanchas, o biológicas como edad, enfermedades, competencia, etc.).

Para extraer la señal paleoclimática de los datos proxy, primero se debe de calibrar el registro. La calibración involucra el uso de registros climáticos modernos y los materiales proxy, para entender cómo y cuán extenso son los materiales proxy dependientes del clima. El análisis de los registros proxy se basa en el principio de uniformidad, el cual asume que las relaciones modernas observadas han operado de la misma forma a través del tiempo (Bradley, 1999).

A continuación se presentan los principales tipos de registros proxy. Cada uno de ellos difiere en su cobertura espacial, el periodo al cual pertenecen y la precisión para identificar los eventos en el tiempo.

- Datos históricos

Información climática pasada tanto cualitativa como cuantitativamente se puede obtener a partir del análisis adecuado de registros históricos. La obtención de información climática a partir de registros históricos se basa en la relación de los efectos que provocaron algunos fenómenos naturales en los diversos sitios y grupos sociales en que se presentaron en distintas épocas. Fenómenos climáticos tales como sequías

prolongadas, heladas, inundaciones, abatieron de manera drástica las actividades productivas provocando desabasto, escasez y carestía, o modificando las características del paisaje.

En el caso de México una buena fuente de información sobre el periodo colonial se encuentra en los registros de alhóndigas, pósitos y registros de diezmos. Pero estos registros muestran únicamente el reflejo de lo que pasaba en las grandes ciudades de la Nueva España y sus entornos, por lo que para muchas regiones no existe esta información (Florescano y Swan, 1995).

A finales del siglo XIX aparecen ya las gacetas y los periódicos que ofrecen otra posibilidad de obtención de datos sobre fenómenos naturales. Existen otras fuentes de información que pueden ampliar el abanico histórico, como podrían ser los registros de tributo, los informes de virreyes, diarios de viajeros o crónicas de soldados y religiosos (García y Escobar, 2000).

- Dendrocronología

En las regiones templadas donde hay una marcada estación de crecimiento, los árboles generalmente producen un anillo anual de crecimiento que registra las condiciones climáticas imperantes de ese año (Fig. 1.2). De esta forma se pueden presentar patrones en el ancho, densidad y composición isotópica de sus anillos, que reflejen las variaciones climáticas. Así, con el análisis dendroclimatológico es posible fechar con seguridad años individualmente y se puede obtener un registro continuo de más de mil años de duración con información paleoclimática de alta frecuencia (Fritts, 1976). Este tipo de registro proxy es el utilizado en el presente estudio, por lo que más adelante se aborda con mayor amplitud.

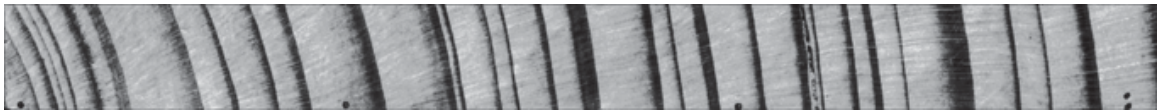


Figura 1.2. Imagen que muestra los anillos de crecimiento (Foto de H.D. Grissino)

- Sedimentos lacustres y marinos

El fondo de algunos lagos y mares revela variaciones estacionales en el contenido y color de las capas sedimentarias, estratificaciones llamadas varvas, que con frecuencia pueden verse a simple vista. Los investigadores barrenan núcleos de los fondos de las cuencas para analizarlos. Los sedimentos se forman

de materiales que fueron producidos en el cuerpo de agua o que han sido lavados de las tierras cercanas entre los que se encuentran restos de organismos.

En el análisis de los sedimentos se pueden encontrar restos de organismos como radiolarios (Hugen, 1998); ostrácodos (Israde-Alcantara *et al.*, 1998); diatomeas (Albuquerque, 1998), cuyos requerimientos climáticos son conocidos. El análisis de los depósitos revela variaciones en los isótopos de oxígeno del material calcáreo causado por fluctuaciones en el volumen del océano que reflejan temperaturas globales y periodos glaciares. Las variaciones de patrones climáticos pueden derivarse tanto por la identificación de especies estenotérmicas como por análisis radioisotópico (Gates, 1993).

- Análisis de polen

Los granos de polen producidos por las plantas tienen formas distintivas que pueden utilizarse para identificar el tipo de planta de la que provino. El análisis de los granos de polen preservados en capas de sedimentos que se forman en los fondos marinos o lacustres indica qué tipo de plantas creció en el tiempo en el que se depositó el sedimento y de esta forma se pueden inferir las condiciones climáticas, como ejemplo se puede citar el trabajo de Israde-Alcántara *et al.*, (1998) quienes trabajaron en el lago de Cuitzeo en Michoacán obteniendo información paleoambiental desde hace 35,000 años A.C. Otro trabajo interesante de comentar es el realizado por Castañeda (1998) quien al encontrar restos de mamuth en la cuenca del Lerma, México, mediante análisis palinológico, pudo inferir el ambiente en el que vivió este animal.

- Arrecifes coralinos

Los corales se desarrollan en mares cuya temperatura superficial es mayor a los 22-23° C, por lo que su distribución se limita a las regiones tropicales.

El esqueleto del coral está compuesto de carbonato de calcio con diferencias de densidad debido a variaciones en la tasa de crecimiento, la cual está relacionada con las condiciones de temperatura y nubosidad, por lo que los corales exhiben bandas estacionales de crecimiento. El carbonato contiene oxígeno e isótopos de oxígeno, así como metales traza que pueden usarse para determinar la temperatura del agua en la que el coral creció. Los registros de temperatura se usan para reconstruir el clima durante el periodo que el coral vivió, el cual puede llegar a ser de cientos o miles de años (Andrews, 1996). Como ejemplo de las investigaciones de este tipo están las realizadas por Dunbar (1998) quien reconstruyó la variabilidad climática relacionada con el ENSO desde 1853 en la región tropical del este del océano Pacífico.

- Núcleos de hielo

En lo alto de las montañas o en los casquetes polares, el hielo se acumula en capas anuales producidas durante las nevadas. El hielo provee un registro único, no solo de precipitación, sino de temperatura del aire, composición atmosférica, la ocurrencia de erupciones volcánicas y variaciones pasadas de la actividad solar (Bradley, 1999).

El grosor de las capas varía de acuerdo con la temperatura. Se han llegado a contar capas anuales que llegan 6000 años atrás en un núcleo mayor a 2 Km de profundidad, con una exactitud no mayor de 50 años (Greene, 1995).

- Depósitos de Neotomas

En los ambientes áridos, la rata de campo del género *Neotoma* construye sus madrigueras en lugares muy protegidos. Estas madrigueras tienen áreas de depósito donde van acumulando capas de materiales que traen de su alrededor. Los materiales incluyen hojas, polen, tallos, huesos de animales, partes de insectos, rocas, etc. que se preservan en muy buenas condiciones al estar en lugares secos y protegidos, además de estar endurecidos por la orina del ratón, que les da una apariencia cristalina oscura. De esta forma se pueden encontrar depósitos antiguos que han persistido a cambios ambientales y que revelan muestras de comunidades bióticas pasadas. Las muestras se fechan con la ayuda del análisis de isótopos de carbón para tener un registro del cambio de vegetación y del clima a través del tiempo (Finley, 1990). Tom Van Devender (1990), por ejemplo, describe evidencias de cambio climático durante el Cuaternario tardío basado en la composición de la vegetación, resultados que obtuvo del análisis de los nidos de *Neotoma spp.* en el desierto de Sonora.

1.2.2. Dendroclimatología.

La dendrocronología se puede definir como el estudio de los anillos de crecimiento arbóreo para fechar eventos pasados, se habla de dendroclimatología cuando estos eventos pasados son climáticos (Stokes y Smiley, 1996).

Cada año, algunos árboles como las coníferas añaden una capa de madera al tronco y a las ramas creando un anillo anual que puede verse en las secciones de los árboles como círculos concéntricos. Cuatro condiciones son necesarias para que los árboles puedan servir para estudios dendrocronológicos:

- Los árboles utilizados deben formar sólo un anillo al año durante la época de crecimiento.

- Sólo uno de los factores ambientales que interactúan en la formación del anillo debe de dominar en la limitación del crecimiento.
- Este factor limitante debe de variar en intensidad año con año. De esta forma se podrá establecer una secuencia de amplitud de los anillos, para compararse entre diferentes árboles.
- El factor limitante debe ser uniformemente efectivo sobre una área geográfica para que se pueda obtener una cronología maestra del área. El anillo anual de crecimiento del xilema se forma al exterior del que se formó en el año anterior y se divide en dos partes, madera temprana y madera tardía. Las células (traqueidas) de la madera temprana se forman al inicio de la época de crecimiento, durante un periodo de rápido crecimiento radial (Fig. 1.2.1). En la madera tardía la actividad del cambium decrece y las traqueidas presentan paredes gruesas con cavidades progresivamente más chicas. El contraste de las últimas células con las primeras del año siguiente es lo que delimita a un anillo. Hay algunas especies que presentan una clara separación entre la madera temprana y la tardía, lo que permiten establecer cronologías específicas que se relacionan con el valor estacional del factor limitante (ver capítulo 3).

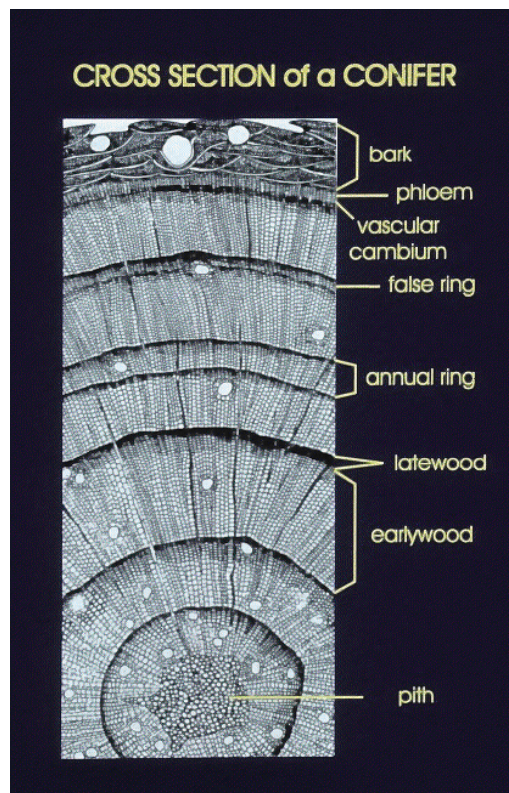


Figura 1.2.1. Esquema de un corte transversal de un tronco que muestra la anatomía de la madera (Fritts, 1976).

La información climática se debe de filtrar a partir de las variaciones interanuales de los anillos de crecimiento, variaciones que pueden ser de medida, densidad o composición isotópica.

En estudios dendroclimáticos, la selección del sitio y de los árboles es importante para minimizar la señal que dejan otros factores ("ruido") en los anillos de crecimiento, por lo que se buscan árboles que estén sometidos a "stress", lo que ocurre generalmente en árboles que crecen cerca de sus extremos ecológicos de distribución, en substrato rocoso y/o poca disponibilidad de agua.

Cuando las muestras se han obtenido de árboles vivos, las cronologías serán tan antiguas como lo sea la longevidad de la especie utilizada. Sin embargo las cronologías se pueden incrementar cuando el patrón de los anillos de crecimiento de muestras obtenidas a partir de tocones, troncos fósiles, o construcciones arqueológicas donde hayan utilizado troncos, coincida con parte de la cronología conocida, para que se pueda asignar las fechas a los anillos de crecimiento (Fig. 1.2.2.). Entre las cronologías más largas del mundo se puede citar la de *Pinus longaeva* en California con 8,400 años; la de *Picea/Larix* en Europa con una duración cercana a los 6,000 años, la de *Quercus* de 7,250 años también en Europa; la de *Austrocedrus* en Argentina y Chile con 1,100 años; *Limbo Cedrus* en Australia con 700 años, entre otras (Schweingruber, 1987). A la fecha hay más de 500 especies de árboles y arbustos con las que se han efectuado análisis dendrocronológicos, (Grissino-Mayer,1993).

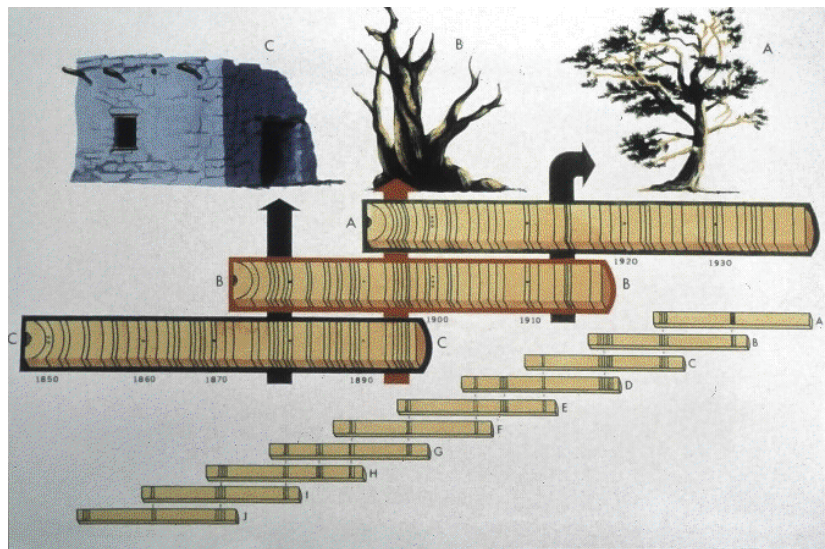


Figura 1.2.2. Forma en que una cronología puede extenderse, (tomado de Laboratory of Tree-Ring Research).

El análisis dendrocronológico puede proveer de información proxy continua de alta frecuencia ya que se puede reconstruir información ambiental anual o inclusive estacional de décadas pasadas, siglos e inclusive milenios, como se ha visto en algunos casos.

1.3. Antecedentes de estudios paleoclimáticos

En el noroeste de México una región con condiciones áridas (ver capítulo 3), uno de los factores determinantes del clima son las corrientes marinas que bañan la región. Estas corrientes cambian en el transcurso del año, dando como resultado que durante el verano las aguas del Golfo de California sean surtidas principalmente por agua ecuatorial y que en invierno alcancen a penetrar en él las aguas frías de la Corriente de California, ocasionando un cambio en el patrón de surgencias y en las condiciones climáticas. Estudios con radiolarios (Molina-Cruz, 1988) indican que en el transcurso del tiempo se han dado cambios de dominancia de las corrientes pero con duraciones de siglos a milenios. A continuación se presenta un panorama cronológico de cambios climáticos reportados con base en estudios paleoclimáticos de la región.

En la historia del planeta tierra han existido diferentes periodos caracterizados por eventos sobresalientes, como es el origen, radiación o extinción de grupos importantes de organismos. Dentro del periodo más reciente, el Cuaternario, la época del Pleistoceno (principalmente reciente) que inició hace 2.5 millones de años es conocida como el inicio de la edad del hielo. Esta época se caracterizó por grandes cambios climatológicos, consistentes en alternancia de periodos de clima frío, con otros de clima cálido o templado. Durante los periodos fríos conocidos como glaciaciones, los hielos polares avanzaron hacia los trópicos invadiendo los continentes, y los glaciares de altas zonas montañosas descendieron hacia las llanuras por los valles, ocupando hasta una quinta parte de la superficie terrestre. Estas variaciones climáticas ocasionaron emigraciones de flora y fauna que quedaron registradas en fósiles. (Candel *et al.*, 1953).

En el área que actualmente está ocupada por el desierto sonorense existía vegetación del tipo de los bosques tropicales, sabana y bosques de coníferas durante el mioceno. Este tipo de vegetación se desplazó hacia el norte, pero aquellos taxa que estaban preadaptados en forma de vida y función lograron sobrevivir al progresivo incremento de aridez que se ha dado desde hace algo más de 70 millones de años, quedando remanentes de la vegetación que antes predominaba en las partes elevadas de la península (Axelrod, 1979).

En el presente estudio se consideran los cambios ambientales ocurridos desde el Pleistoceno, época en que la Península de Baja California alcanzó su configuración actual, hace aproximadamente 1.8 millones de años (Padilla *et al.*, 1988); hasta el presente.

1.3.1. Pleistoceno

La fauna del sur-centro de Estados Unidos y de Chihuahua se estableció en el Pleistoceno, con movimientos al oeste durante las glaciaciones y al este durante las interglaciaciones (Van Devender y Bradley, 1994). Para esta época existe un estudio con terrazas marinas (Sirkin *et al.*, 1990) que indica que hubo una etapa interglacial (etapa cálida), hace aproximadamente 125, 000 años, cuando en la parte media y norte del Golfo de California el nivel medio del mar se estima que estuvo entre 4 y 9 metros por arriba del nivel actual. Esto puede ser indicio de que las temperaturas durante ésta época alcanzaron temperaturas elevadas a las actuales.

Un estudio con fósiles de vertebrados terrestres encontrados en la parte media de la península de Baja California (Miller, 1977) indica que en la última parte del Pleistoceno existían condiciones más húmedas y una mayor cantidad de vegetación para la península.

La última glaciación se extendió de 22,000 a 14,000 años antes del presente, con su máximo hace 18,000 años, esta etapa recibe diferentes nombres en el mundo, en Norte América se le conoce como Wisconsin. Con pocas excepciones casi todo el planeta parece haber estado más seco, acompañado de una baja temperatura superficial del mar (Crowley y North, 1991).

Especies efímeras con crecimiento restringido al verano o a invierno-primavera se consideran indicadores de la estacionalidad de lluvias en los estudios paleoecológicos. Así pues, la presencia pasada de especies perennes que vivieron en el pasado y que ahora están confinadas en ambientes riparios es indicativa de que hubo una mayor precipitación. Considerando lo anterior, se deduce que para el norte de la región, a fines del Wisconsin (13,000 años antes del presente) en general hubo un enfriamiento fuerte en los veranos y un cambio a la precipitación en invierno, con una reducción de la frecuencia de las catastróficas heladas invernales. La lluvia fue de un 55 a 70% veces mayor que en la actualidad y las lluvias de verano estuvieron prácticamente ausentes. El clima con patrones de lluvia biestacionales se desplazó al sur de Sonora (Van Devender, 1990). Registros de diatomeas de lagos de Chihuahua indican la existencia de agua profunda en las cuencas de Alta Babicora y Encinillas a finales de esta época (Metcalf *et al.*, 1997).

El patrón de circulación oceánica de la costa oeste de Norte América, que se infiere a partir de un estudio con radiolarios (Sabin y Pisias, 1996) indica que la corriente del Pacífico Norte estaba más al sur de lo que esta ahora, hace 15,000 años antes del presente. A partir de este estudio se deduce que la zona de transición estaba más al sur. Lo mismo ocurría con la ubicación de la celda Norpacífica. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Molina-Cruz (1988) en su estudio con radiolarios, donde encuentra que de

33,000 a 15,500 años antes del presente la Corriente de California frecuentemente invadía el Golfo de California.

Un abrupto calentamiento ocurrió durante una deglaciación hace 13,000 años antes del presente. Este calentamiento duró entre 200 y 300 años. El clima se enfrió nuevamente durante un intervalo que duró como mil años conocido como "Younger Dryas" (11,000 años antes del presente) (Crowley y North, 1991). Para este tiempo están reportadas condiciones secas en el desierto de Sonorense (Spaulding y Graumlich, 1986). También está reportada la presencia de un episodio seco en estos tiempos en Chihuahua (Metcalf *et al.*, 1997).

En la cuenca de Guaymas, ubicada en el Golfo de California se infiere, a partir de estudios con foraminíferos (Keigwin y Jones, 1990), que tanto en las etapas glaciales como en "Younger Dryas" las surgencias se vieron muy disminuidas.

1.3.2. Holoceno

Hace 10,000 años antes del presente inicia la época más reciente del cuaternario: el Holoceno.

Holoceno temprano (10,000-8,900 años antes del presente).

Es considerado como una etapa cálida, estudios realizados con nidos de *Neotoma spp.* indican que el clima del Desierto Sonorense fue transitorio entre el Winsconsin tardío y regímenes más modernos. Las temperaturas de verano aún eran frías; la precipitación fue mayor que la actual, incrementándose ligeramente las lluvias de verano, aunque continuaba la dominancia de las lluvias de invierno. La celda de presión alta de Bermuda, aparentemente no estaba lo suficientemente desarrollada para promover las lluvias monzónica de verano (Van Devender, 1990).

A las mismas conclusiones llegan Anderson y Van Devender (1995) indicando que el 17.6% de las especies de este tiempo no existen en la actualidad; había una persistencia de las surgencias en el Golfo de California y para su parte norte el nivel del mar era menor en 40m a su nivel actual. Además de estas características Van Devender *et al.* (1994) señalan que en la Sierra Bacha de Sonora, la vegetación estaba dominada por *Fouquieria columnaris* (cirio) reflejando una vegetación y clima similar al que en la actualidad existe en Baja California.

En un estudio con secuencias laminadas en el Golfo de California más que detectar periodos fríos o cálidos se observaron periodicidades de 50, 11, 22-24 años a inicios del Holoceno (Pike y Kemp, 1997).

Holoceno medio (8900-4500 años antes del presente)

En el Desierto de Sonora los veranos en esta época fueron más cálidos, con una gran frecuencia de heladas invernales severas y catastróficas. La lluvia continuaba siendo mucho mayor que en la actualidad y con un pequeño incremento en las lluvias de verano (Van Devender, 1990). Esto se confirma también para Chihuahua a partir de un estudio con sedimentos de paleolagos (Metcalfe *et al.*, 1997).

Al norte de la región noroeste de México, correspondiente al sur de California están reportados cambios en la fauna marina alrededor de 5,400 años antes del presente, que reflejan un marcado enfriamiento en la temperatura superficial del mar y que es coincidente con cambios en la vegetación terrestre (Pisias, 1978). Para ese tiempo, Pérez (2000) basándose en un estudio con sedimentos marinos infiere condiciones áridas con intensa evaporación en la Bahía de La Paz.

Holoceno tardío (4,500-0 años antes del presente)

A nivel mundial está reportado un regreso a los climas fríos y secos entre 4,000 y 2,500 años antes del presente, conocido este periodo como Neoglaciación (Crowley y North, 1991). Específicamente para diferentes partes de la región existen estudios que nos muestran particularidades de cómo fue el ambiente, por ejemplo: evidencias en los nidos de *Neotoma spp.* en Baja California sugieren que la composición de la vegetación durante esta época era similar a la actual, aunque diferente en su distribución y abundancia (Sankey, *et al.*, 2001).

Para esta época se reporta en Sonora (Anderson y Van Devender, 1995) una tendencia a incrementarse la aridez, menor cantidad de heladas que en la actualidad, los veranos fueron más calientes y las lluvias de verano (monzón) o huracanes de otoño se incrementaron, inclusive fueron ligeramente mayores que en la actualidad. Los huracanes que cruzaban la península a una latitud de 30° N pueden reflejar una temperatura superficial del mar mayor que la actual. Estos resultados concuerdan con los estudios de Pérez (2000) quien identifica en este periodo en la Bahía de La Paz un clima cálido con incursión del agua superficial ecuatorial.

El régimen de clima moderno se estableció en esta época y la incidencia de una adecuada lluvia de verano produjo climas más subtropicales en el Desierto Sonorense, teniendo los inviernos más cálidos del Holoceno (Van Devender, 1990).

Dentro del Holoceno tardío también hubo indicios de intervalos más húmedos, como los reportados por Polyak *et al.*, (2001) quienes describen condiciones más mésicas que las actuales al analizar los ácaros preservados en estalagmitas en cuevas del desierto de Chihuahua.

1.3.3. Presente

Para Europa, el advenimiento de la edad oscura coincide con el regreso de los climas fríos del año 500 al 1,000 d.c., que después fue seguido por el óptimo Medieval aproximadamente del 1,100 al 1,300, en el cual las temperaturas en Europa alcanzaron los valores máximos de los últimos 4,000 años, aunque no se sabe con certeza si esas temperaturas fueron mayores que las observadas para la década de los 80 en el siglo XX (Crowley y North, 1991). Después del óptimo Medieval las temperaturas se desplomaron en el periodo frío más reciente conocido como Pequeña Edad de Hielo que inició a mediados del siglo XV y duró cuatro siglos, terminando hasta mediados del XIX. La tendencia cálida se interrumpió a mediados del siglo XX (de 1940 a 1970) y desde entonces el clima continúa calentándose (Bonnicksen, 2000).

Podría pensarse que a partir de esta época, el presente, los estudios paleoclimáticos para la región serían más abundantes, pero no es el caso. Entre los pocos que existen se encuentra el estudio dendrocronológico realizado por Villanueva-Díaz (1998) en el que indica que hubo una sequía de 1566-1593, la cual debe haber sido la más intensa y prolongada en los últimos 600 años en Sonora.

Juillet *et al.* (1981) encontraron en el Golfo de California condiciones de baja productividad asociada a condiciones de humedad de 1580 a 1800, pero de 1800 a 1900 la temperatura superficial decrece y la productividad aumenta. Reconstrucciones ambientales cuyo ámbito cae dentro del periodo en que ya existen registros climáticos infieren, a partir de estudios con varvas marinas, esas mismas condiciones para el Golfo de California durante 1950-1980 (Schrader y Baumgartner, 1983).

En los tiempos presentes muchos de los cambios ambientales que observamos han sido favorecidos por actividades humanas, por ejemplo, en las zonas áridas y semiáridas del desierto de Chihuahua, aparentemente a partir de 1800's a consecuencia del pastoreo, control de incendios y cambios climáticos han habido cambios en la vegetación con una reducción de pastos perennes y un aumento de vegetación de tipo arbustiva (Schmidt, 1988).

Con el panorama anteriormente señalado sobre los cambios climáticos ocurridos en la región, se efectuó el presente estudio, en el cual se utilizaron técnicas dendrocronológicas para obtener información más detallada de las variaciones interanuales climáticas durante los últimos siglos, y ya que se trata de una región con un ambiente árido, se resalta el análisis de la frecuencia de las sequías que afecta tanto a sus recursos naturales como a las actividades económicas que aquí se realizan. En el capítulo siguiente se presentan los objetivos que se plantearon.

2. Objetivos

Gran parte de la región noroeste de México presenta vegetación de ambientes áridos con un clima muy similar, por lo que las variaciones climáticas que se reconstruyan mostrarán la variabilidad representante de la región. Sin embargo para la parte este de la región, separada por la Sierra Madre Occidental (Chihuahua y Durango), el comportamiento climático histórico, puede variar ya que son diferentes factores los que lo determinan.

Durante el diseño de este trabajo se plantearon las siguientes interrogantes:

- Los estudios dendrocronológicos con árboles tropicales son muy limitados por que no producen claramente anillos anuales de crecimiento. ¿Serán útiles para hacer reconstrucciones dendroclimáticas los pinos de la Sierra de La Laguna que se desarrollan prácticamente en el trópico de Cáncer en altitudes mayores a los 1,400 m.s.n.m.?
- En el caso de que se obtenga una reconstrucción climática, ¿las variaciones que se observen serán reflejo de lo que ocurre localmente (Sierra de la Laguna o Chihuahua) o reflejarán un patrón de variación climática regional?
- ¿Está relacionada la frecuencia de eventos climáticos extremos con factores semiperiódicos que influyen en el clima, como el ENSO?

2.1. Objetivo general

Realizar una reconstrucción de la variabilidad climática interanual e interdecadal mediante el uso de técnicas dendrocronológicas, en la región noroeste de México.

2.2. Objetivos particulares

- Analizar los estudios paleoclimáticos que se han realizado en la región identificando los periodos comunes y tendencias climáticas.
- Obtener la dendrocronología en el sur de la Península de Baja California y analizar su sensibilidad climática.
- Realizar la reconstrucción de la precipitación mediante el uso de la dendrocronología obtenida.

- Evaluar la representatividad de la reconstrucción de la precipitación invernal en el noroeste de México.
- Realizar la reconstrucción de la precipitación invernal para Chihuahua por medio del análisis dendrocronológico de madera temprana de abeto e identificar los periodos de sequías.
- Analizar la influencia del ENSO en la precipitación de la región.
- Comparar las dendrocronologías existentes en la región analizando la existencia de señales comunes.

3. Características de la región noroeste de México

El noroeste de México se encuentra en una zona de transición climática entre tropical y subtropical, teniendo como uno de sus aspectos más sobresalientes la aridez. La región se ve afectada por muchos elementos que determinan su clima, entre los elementos oceánicos que destacan está la Corriente Oceánica de California, con temperaturas que oscilan entre los 13 y los 19° C. Esta corriente produce un enfriamiento en la parte inferior de las capas atmosféricas lo cual frena sus movimientos verticales y trae consigo una considerable ausencia de condensación, que permite sólo la formación de nubes bajas y neblinas. El efecto "secante" de la corriente de California abarca Arizona, Nuevo México, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y el norte de Tamaulipas (García, 1978). Asociada a esta corriente se localizan las surgencias marinas de Punta Eugenia y Bahía Magdalena. La corriente de California se disipa al sur de la Península de Baja California al encontrarse con las aguas del Océano Pacífico tropical.

El Golfo de California es alimentado con aguas del Océano Pacífico tropical sobretodo durante el verano; presenta una escasa profundidad en su extremo norte, por lo que funciona como una cuenca de evaporación (Flores, 1998), mientras que al sur el clima de la parte continental es tropical con lluvia que excede a la evaporación (Keigwin y Jones, 1990). Existen también surgencias marinas en el Golfo de California, provocadas por los vientos y por el efecto de las mareas; durante el verano las surgencias se dan en la costa peninsular y en invierno en la costa continental.

La región noroeste de México se encuentra dentro de la faja subtropical de alta presión, particularmente ejerce su influencia la celda semipermanente de alta presión del Pacífico nororiental. En este tipo de celdas el aire se calienta por compresión adiabática disipando las formaciones nubosas dándole el carácter seco a la región (Hastings y Turner, 1965). En el verano los vientos soplan del sureste, mientras que en el invierno soplan del noroeste, lo que hace que se disminuya la influencia de la Corriente Ecuatorial en el Golfo de California y que la Corriente de California llegue más al sur (Molina-Cruz, 1988).

Por otra parte, el Sistema Californiano, cadena montañosa que corre a lo largo la península de Baja California, con alturas de hasta 3,000 m bloquea en parte la influencia del océano Pacífico al oriente de la región, por lo que el Golfo de California presenta un clima "continental" sujeto a extremos ambientales que determinan condiciones diferentes de humedad y temperatura en la costa oriental de la península.

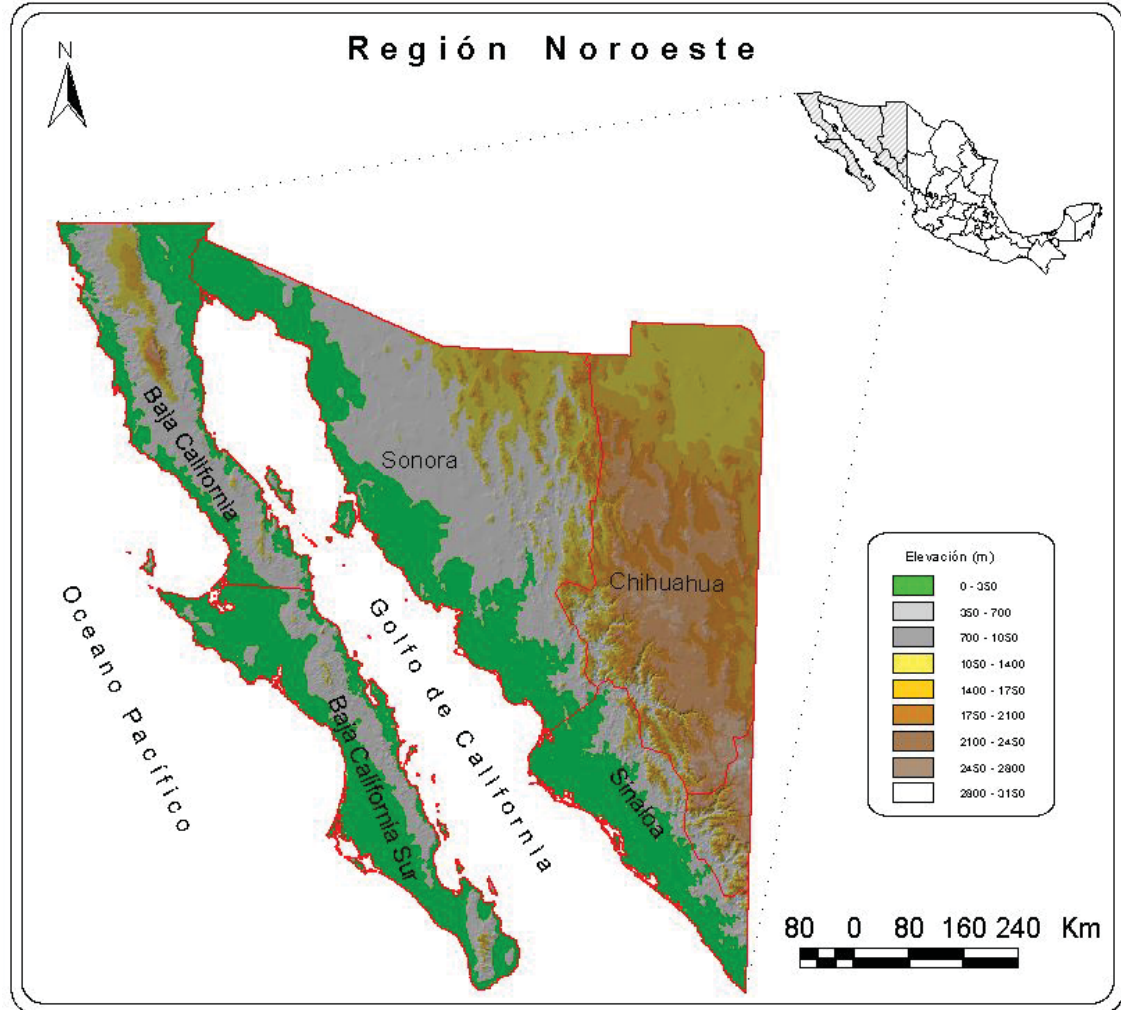


Figura 1.3.1. Mapa que muestra la zona de estudio donde se pueden apreciar las diferencias de elevación, correspondiendo en la península de Baja California al Sistema Californiano y en el continente a la Sierra Madre Occidental (modificado de <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html>).

La distancia mayor a la corriente fría de California, los vientos del oeste que transportan la humedad del Golfo de California y el Sistema Californiano, son algunos de los factores que favorecen que las zonas costeras de Sonora y norte de Sinaloa presenten condiciones de aridez menos extremas que la Península de Baja California (Salinas-Zavala, 2000).

La región noroeste de México comprende un rango de amplitud aproximado de 12° de Latitud N (22-33) presentándose variaciones ambientales debidas a este amplio rango latitudinal, sin embargo, debido a la influencia de los cuerpos de agua y a las unidades orogénicas también se dan variaciones climáticas en sentido este-oeste, de esta forma, en la Península de Baja California las temperaturas son mayores en la costa del Golfo que en la del Pacífico. Para la región continental el efecto altitudinal de la Sierra Madre

Occidental ocasiona que las temperaturas disminuyan en forma general en sentido oeste-este, con las temperaturas mayores presentes en la costa del golfo.

El carácter desértico de la región se ve modificado en función de los efectos característicos de la altitud en la producción de máximos de precipitación a barlovento de las montañas (Sistema Californiano y Sierra Madre Occidental) y mínimos a sotavento de las mismas (Fig. 1.3.2.).

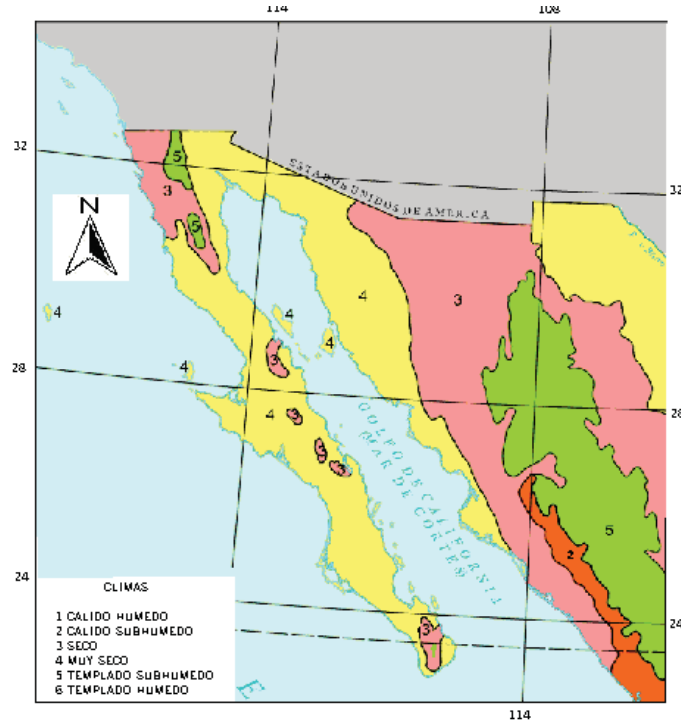


Figura 1.3.2. Distribución de climas en el noroeste de México, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1973).

La región presenta dos diferentes regímenes de precipitación, las lluvias en la región, las de invierno que predominantemente se presentan de noviembre a febrero y las de verano o lluvias monzónicas que ocurren de julio a octubre. Estas lluvias monzónicas se inician en Oaxaca en los primeros días de junio y su entrada se va retrasando conforme se avanza en latitud, para iniciarse a mediados de julio en Arizona (Douglas y Englehart, 1995) De la mitad norte a dos tercios de la vertiente occidental la península recibe la mayor parte de su lluvia anual durante los meses de invierno, el resto de la región recibe la mayor parte de sus lluvias en verano, teniendo mayor peso hacia el sur. De hecho los estados de Sinaloa y Sonora son típicamente los más húmedos de México durante los meses de julio y agosto (Douglas y Englehart, 1995)

El predominio de lluvia en alguno de los dos periodos se observa claramente en la figura 1.3.3. la cual se obtuvo con los registros de 53 estaciones meteorológicas de la región. Para realizarla a la cantidad total de las lluvias de verano (julio a octubre), se le restó la cantidad total de las lluvias de invierno (noviembre a diciembre), por lo tanto los valores positivos indican las zonas con predominio de lluvias de verano, mientras que las zonas con predominio de lluvias invernales se muestran con valores negativos.

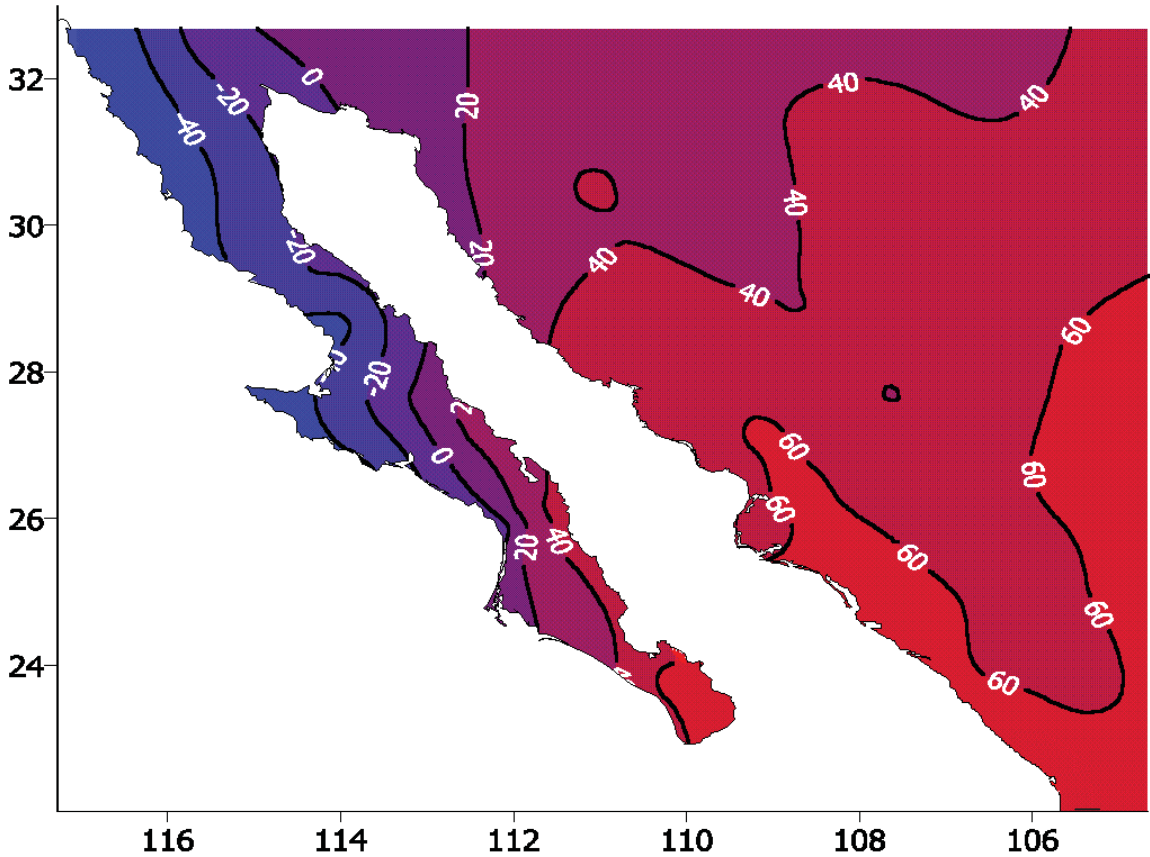


Figura 1.3.3. Diferencia de precipitación verano-invierno en el Noroeste de México, los números positivos indican áreas con predominio de lluvias de verano y los negativos predominio de lluvias de invierno.

Otra fuente de humedad son los ciclones tropicales que afectan de mayo a noviembre al sur de la región sobre todo a la Península de Baja California, aunque la mayor frecuencia se da de fines de agosto a septiembre; estos eventos traen consigo temperaturas superiores al promedio, lluvias torrenciales y fuertes vientos, llegando frecuentemente a proporciones de huracanes (Hastings y Turner, 1965).

El clima de la región se ve fuertemente afectado por el fenómeno semiperiódico conocido como ENSO por sus siglas en inglés (El Niño Southern Oscillation). El Niño consiste en un calentamiento de las aguas superficiales al este en el océano Pacífico tropical, dando como resultados cambios climáticos que se manifiestan de diferentes formas en lugares muy distantes en el mundo. El Niño se trata de un evento cuya duración es mayor a un año y se ha presentado con una frecuencia que va de 3 a 7 años; se alterna con La

Niña, la fase opuesta de temperaturas del océano Pacífico tropical más bajas del promedio. Por su parte, la Oscilación del Sur es un patrón de cambio en la atmósfera que se relaciona de manera estrecha con estos cambios en el océano (Trenberth, 1999).

Durante su fase cálida conocida como El Niño, el clima del noroeste de México se correlaciona con inviernos más lluviosos, mientras que en su fase fría, conocida como La Niña se relaciona con inviernos secos.

El fenómeno ENSO afecta a los ecosistemas de la región en diferentes formas, por ejemplo:

1) Entre el área de las Islas Coronado a Bahía del Rosario se desarrollan grandes extensiones cubiertas por algas gigantes de *Macrocystis pyrifera*. Su importancia radica en constituir el hábitat de muchos organismos dependientes de ésta alga, además de ser un valioso recurso para el hombre al aprovecharse en la producción de alginatos. Durante los fenómenos de El Niño, las altas temperaturas asociadas a él provocan el deterioro de estos bosques, como en el caso de El Niño de 1982-1983 en el que estos bosques quedaron desbastados (Hernández, 2000).

2) La langosta espinosa californiana ha observado cambios en sus índices reproductivos durante eventos ENSO (Vega *et al.*, 2002).

3) Los eventos del ENSO provocan modificaciones en la distribución de la ballena gris *Eschrichtius robustus* y en su mortalidad como consecuencia de los cambios en la disponibilidad de alimento en la laguna San Ignacio, B.C.S. (Urbán y Gómez-Gallardo, 2001)

4) Al utilizar el análisis de información satelital en la península, Mercado (2001) encontró que la vegetación se ve favorecida por la ocurrencia de El Niño.

5) El evento de La Niña de 1998 provocó un decremento en la población de roedores pequeños en el desierto árido tropical de B.C.S. (Alvarez-Castañeda y Cortés-Calva, 2001)

6) Los rendimientos agrícolas del trigo se ven incrementados durante la fase cálida de El Niño en el valle de Mexicali y Caborca (Salinas-Zavala, 2001).

Los dos capítulos que se presentan a continuación son los estudios dendrocronológicos realizados en la Sierra de La Laguna y Chihuahua y su relación con el clima regional. Ambos estudios reflejan la variabilidad climática regional y la manera como el Niño lo afecta.

4. A TREE-RING RECONSTRUCTION OF PAST PRECIPITATION FOR BAJA CALIFORNIA SUR, MEXICO

Sara C. Díaz¹, Ramzi Touchan², and Thomas W. Swetnam²

Publicado en:

International Journal of Climatology. 21: 1007-1019 (2001).

ABSTRACT

There is great interest in the climatic variability of Baja California and the Sea of Cortes, but long-term information is limited because instrumental climate records begin in the 1940s or 1960s. We developed the first tree-ring chronology of *Pinus lagunae* from the southern part of the Baja California Peninsula and use the chronology to reconstruct the history of precipitation variations. A September-July precipitation reconstruction is developed for the span AD 1862 to 1996 ($R=0.71$, $P<.0001$, $N=56$, cross-validation = 0.68). We use this reconstruction to assess precipitation variability over the past two centuries, including the relationship with ENSO events. The reconstructed precipitation indicates an epic drought from 1939 to 1958. It also shows that 1983, one of the strongest El Niño events of the twentieth century, is the wettest. El Niño events during the 20th century are associated with above-normal precipitation, whereas La Niña events are characterized by below-normal precipitation. Four of the most extreme wet years occurred in association with these warm events (1905, 1912, 1919, and 1983). Seventy-one percent of La Niña events are characterized by below-normal precipitation. Sixty-two percent of El Niño events are characterized by above-normal precipitation. Tree-ring growth of *Pinus lagunae* is most strongly correlated with winter precipitation in Sonora, Sinaloa, and southern Baja California Sur. Precipitation data from meteorological stations in northern Baja California do not correlate well with the tree-ring chronology because this zone has a Mediterranean climate which differs from the rest of northwest Mexico.

Keywords: Dendroclimatology, Baja California Sur Mexico, *Pinus lagunae*, ENSO-precipitation, Sierra de La Laguna.

1. INTRODUCTION

In many regions meteorological records are too sparse to investigate regional climatic patterns (Anderson, 1990). These data are frequently limited to the most recent decades and come from stations located at lower elevations, thus providing poor temporal and spatial coverage (Metcalf, 1987). For northwest Mexico, most of the climate data

starts in the 1950s and contain little information on variability of climate over decades and longer. Indirect evidence of climatic variability such as long time series of tree-ring growth measurements may serve as proxy records of past conditions (e.g. Schulman, 1956; Fritts, 1976; Stahle *et al.*, 1998). A major reason for investigating past climate variability is because it is a key factor directly and indirectly affecting ecological processes and human economies.

Few dendrochronological and dendroclimatological studies have been done in Mexico and even fewer in tropical regions. The most southerly studies on the North America continent were done in Michoacán in Central Mexico, where the signals of spring precipitation and winter temperature were recorded by *Abies religiosa* (Huante *et al.*, 1991). An examination of tree rings of the same species near Mexico City showed decreases in ring widths over the past 30 years caused by air pollution (Alvarado *et al.*, 1993).

In northwest Mexico, studies reconstructing fire histories (Swetnam and Baisan, 1996; Villanueva-Diaz and McPherson, 1995; Villanueva-Diaz, 1996) and dating archeological sites (Buk and Minnin, unpublished; Scott, 1963, 1966) have concentrated on forests near the United States border (Sierra San Pedro Mártir and the Sierra Madre Occidental). Elsewhere in northwest Mexico, dendroclimatic studies have been used to evaluate precipitation patterns and trends (Rueda, 1983). Michaelsen (1989) studied the frequency of El Niño events. Other researchers have reconstructed El Niño Southern Oscillation (ENSO) events and indices (e.g. Lough and Fritts, 1985; Lough, 1992; Cleaveland *et al.*, 1992; Stahle and Cleaveland, 1993; Stahle *et al.*, 1998, 1999). Stahle and Cleaveland (1993) found that the strongest and most consistent ENSO signal in tree rings is in northern Mexico and the southern United States. They used a network of tree-ring chronologies from these regions to reconstruct a winter Southern Oscillation Index from 1699 to 1971. Villanueva-Diaz (1998) found that winter precipitation and chronologies of earlywood widths tend to be enhanced during warm ENSO events in Chihuahua and Durango to the east of our study area. Stahle *et al.* (1999) reconstructed winter precipitation in Durango and found that this season was significantly correlated with indices of ENSO.

O'Hara and Metcalfe (1995), using tree-ring records from Baja California, Sonora, and Chihuahua, and historical evidence from the valley of Mexico City, identified Mexican climate fluctuations over the past 600 years, though they did not find a clear climatic relationship between north and central Mexico. Villanueva-Diaz and McPherson (1995) reconstructed Palmer Drought-Severity Indices (PDSI) for the borderlands of Sonora, but comparable reconstructions of PDSI or precipitation from more southerly states are not yet available.

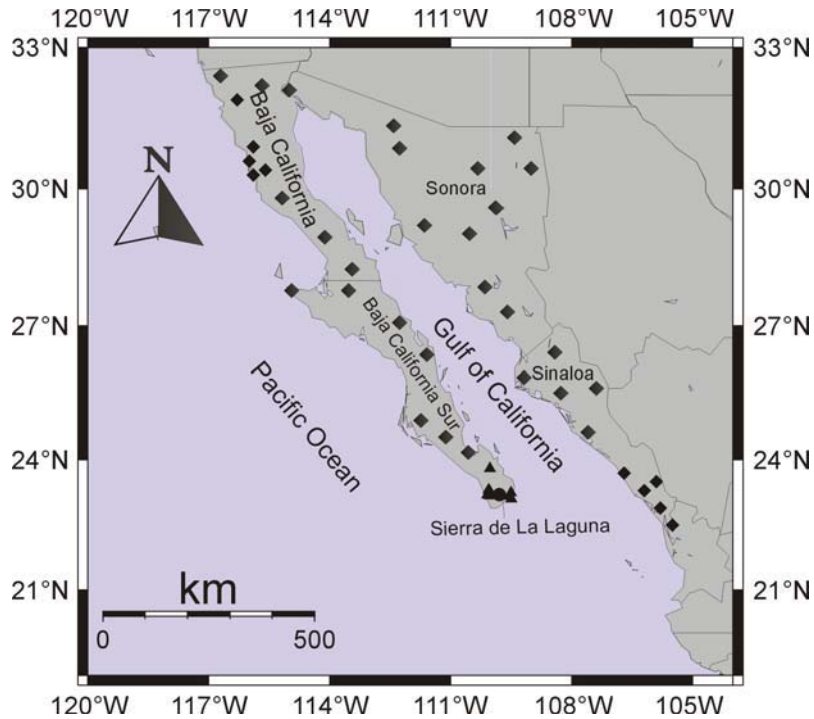


Figure 1. Map of the study area. Triangles (▲) represent the seven weather stations closest to the Sierra de La Laguna tree-ring site that were used in the precipitation reconstruction. Diamonds (◆) represent other regional weather stations used to compare region-wide precipitation patterns to the tree-ring chronology.

The variability of the climate in Mexico makes it important to determine the paleoclimate data for each region. Except for a study by Biondi and Fessenden (1999), there are no dendrochronological studies for Baja California Sur and the coastal plain of Sinaloa and Sonora attempting to develop climatic reconstructions or determine climate variations. The broad goals of the current study were to (1) develop a tree-ring chronology using the endemic pine *Pinus lagunae* from Sierra de La Laguna at the tip of the peninsula of Baja California, (2) use the chronology to develop a dendroclimatic reconstruction for the southern part of the peninsula, (3) use the chronology to evaluate broad-scale winter precipitation patterns in the Baja California and Sea of Cortes region, and (4) use tree-ring reconstructions to evaluate the potential influence of ENSO on winter precipitation and tree-ring patterns in this region.

2. SITE DESCRIPTION

Northwest Mexico comprises four states surrounding the Sea of Cortes: Two on the peninsula of Baja California (Baja California and Baja California Sur), and Sonora and Sinaloa on the mainland (Fig. 1). The Tropic of Cancer crosses the region near 22°50'N Latitude. The peninsula of Baja California begins at the United States border near 32°30'N Latitude. It is approximately 1,400 km long and varies from 45 to 200 km wide (Hastings and Turner, 1965). The topography and climate of the peninsula is dominated in the north and west by the central mountain axis, the Sierra

Juárez and the Sierra San Pedro Mártir, and in the south by the Sierra de La Laguna (Shreve, 1942).

The Sierra de la Laguna (22°50'-24°N; 109°45' -110°115'W) is a small mountain range in the extreme southern end of the peninsula (Fig. 1). The middle and high ranges of the Sierra are surrounded by desert environments and sea. The flora and fauna of the Sierra have developed unique species because the Sierra de La Laguna, as part of Cape Region, was isolated from the rest of the continent during the Miocene (Arriaga and Ortega, 1988). In its upper portion, the only pine-oak forest of the state covers about 20,000 hectares (Villa-Salas, 1968) at an altitude ranging between 1,800 and 2,000 m above sea level. The soil of the Sierra de La Laguna is granitic and in the highest part the dominant soils are Euthric cambisols. These soils are associated with Haplic phaeozem and Humic cambisol rich in phosphorous, moderate in calcium and potassium, and with low magnesium (Maya, 1988).

Northwest Mexico is in a climatic transition zone (tropical-subtropical). Many factors influence the climate in this area, including the cool waters of the California Current (moving from the polar region toward Ecuador), the warm Gulf of California, and the Pacific tropical current. Atmospheric subtropical high pressure and maritime polar air from the Pacific Ocean also influence the region (Hastings and Turner, 1965). The air mass brings fog, drizzle, and occasional moderate precipitation over the northern portion of this area during the winter months. The Pacific coast of the state of Baja California is more Mediterranean in nature (Comrie and Glenn, 1998). Tropical cyclones are crucial in determining the total annual precipitation and mainly influence the southern part of the region. They occur mostly in August, September, and October (García-Oliva *et al.*, 1991). The dry season extends from November to late June in the southern part, although winter rains occur periodically in small amounts.

The precipitation in the southwestern USA and northwest Mexico is associated with El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events (Andrade and Sellers, 1988). The ENSO is correlated with moist-cool conditions over northern Mexico (Kiladis and Díaz, 1993; Stahle and Cleaveland, 1993). Wet winters are typical during warm El Niño events, and dry winters are prevalent during cold La Niña events (Douglas and Englehart, 1981; Andrade and Sellers, 1988).

There are four different dry climate types in northwestern Mexico: (1) steppe with winter rains, (2) desert with winter rains, (3) desert with rains during all the year, and (4) desert with summer rains (García, 1981). A great part of the region is arid, based on characteristics of the vegetation where the predominant vegetation is desert-like xerophilus scrub and thorn forest. At higher altitudes, the prevailing dryness is somewhat mitigated and there are deciduous-tropical and conifer-oak forests (Rzedowski, 1978). There are similar forest stands on Islas Cedros and Guadalupe that have some potential for dendrochronological work. The larger forests are on the mainland in the Sierra Madre Occidental.

The Sierra de la Laguna pine-oak forest overstory is dominated by the endemic species *Pinus lagunae* and the oak *Quercus devia*, with *Arbutus peninsularis* and *Nolina beldingii* dominant in a lower tree stratum (Mercado, 1993). *P. lagunae* is the species used in this study. *P. lagunae* was formerly considered a variety of *P. cembroides*, but in 1987 its taxonomic level was upgraded to a species (Passini, 1987). Two other oak species, *Q. rugosa* and *Q. arizonica*, have a restricted distribution within the forest (Arriaga *et al.*, 1992). The common species in the understory are *Calliandra peninsularis*, *Heterotoma aurita*, *Verbesina pustulata*, and *Hypericum peninsularis*, and some short-lived species like *Arracacia brandegeei*, *Desmodium postratum*, *Stachys coccinea*, and *Tagetes lacera* (León de La Luz and Domínguez-Cadena, 1989).

3. METHODS

3.1. Chronology development

Two increment cores were taken from each of 80 pine trees in the forest of the Sierra de La Laguna. To minimize non-climatic influences on ring growth, only trees with no obvious injury or disease were sampled. To maximize the ages of sampled trees and the length of the tree-ring chronology the tallest and largest diameter trees were sampled. Cores were mounted and fine-sanded. All tree rings were crossdated to their exact year of formation by standard dendrochronological techniques (Stokes and Smiley, 1968). The annual rings of each core were measured to the nearest 0.01mm. Each ring-width measurement series was detrended by fitting a cubic smoothing spline with a 50% cutoff frequency of 100 years to remove the age trend and the effects of stand dynamics (Cook and Kairiukstis, 1990). The index series were combined into a master chronology using a biweight robust estimate of the mean (Cook, 1985).

3.2. Precipitation reconstruction.

As typical with tree-ring chronologies, sample size (number of measured ring-width series included in the chronology) decreases with time before the present. We used subsample signal strength (SSS) to determine the adequacy of sample replication in the early years of the chronology where the number of the samples is usually smaller than in the more recent period (Wigley *et al.*, 1984). To ensure the reliability of the climate reconstruction, based on the sample size and between tree correlations, we restricted our analysis to the time period with a SSS of at least 0.80, which in our data sets represents a sample size of three trees. The chronology spans the period AD 1862 to 1996.

We selected seven meteorological stations close to the sampling site with both monthly total precipitation and monthly mean temperature records. We obtained climate records from two Mexican Federal agencies, the Biological Research Center (CIB) and National Water Commission (CNA) (Salinas-Zavala, 1995). We estimated

missing data by the method of Paulhus and Kohler (1952), and used double-mass analysis (Kohler, 1949) to test for inhomogeneity between stations. Averaging the seven meteorological stations developed the regional climate record. There was a significant correlation ($R = 0.79$, $P < 0.05$) between the climate stations for the period AD 1940 to 1996 (57 years).

Response function analysis (Fritts, 1976) was done using the chronology and monthly and seasonal precipitation and temperature data covering the same period to determine the most appropriate model for reconstruction. A linear regression equation between the predictors (tree-ring indices) and the predictand (climatic data) was computed for the calibration period. To evaluate the goodness-of-fit of the model, cross validation was done by the PRESS procedure (Weisberg, 1985).

Spectral analysis was used to evaluate periodic behavior of the reconstructed precipitation time series. A spectrum of the reconstructed precipitation was estimated by smoothing the periodogram with a succession of Daniel filters (Bloomfield, 1976). Five percent of each end of the series was tapered with a raised-cosine filter (Hamming, 1983), and the series was padded with zero to length 256 year. The periodogram of the series (1860-1997) was computed by discrete Fourier transform and smoothed by a 7-weight Daniell filter to produce the estimated spectrum. A null continuum was calculated by smoothing the periodogram successively with broader filters (window length of 33 and 55) than used for the spectral estimates. The 95% confidence intervals for the spectral estimates were computed based on the assumption of a chi-square (Bloomfield, 1976; Meko *et al.*, 1985).

3.3. ENSO analysis

Extreme wet and dry years in the standardized reconstructed precipitation (1862-1996) were compared with the ENSO events. We used an arbitrary threshold of 0.5 standard deviation above or below the mean to determine El Niño years (> 0.5 s.d.) and La Niña years (< -0.5 s.d.). We also computed the number of events that occurred below or above the mean. The probability of observing these co-occurrences by chance was computed by means of contingency (Chi square) tests. For comparison with the standardized reconstructed precipitation dates, El Niño and La Niña events were assigned calendar dates of the year following the start of the warm and cold events (Kiladis and Díaz, 1993).

3.4. Relationship Between the Tree Ring Chronology and Regional Meteorological Station Precipitation Data

Monthly and seasonalized precipitation data from 48 stations were correlated with the tree-ring chronology to search for a relationship between tree growth and the climate of northwest Mexico. Those precipitation series correlating with the tree-ring chronology with a coefficient greater than 0.5 were analyzed by rotated Principal Component

Analysis (PCA) to evaluate the spatial relationships. Two components were retained explaining 76% of the variance. The first component explained 48% of the variance, and the second 28%. The first component grouped 16 stations with a loading greater than 0.7. Nine of these series were in Sinaloa, with two series in Sonora, but very close to Sinaloa, and five from Baja California Sur. The second component grouped eight series, five from Sonora and three from Baja California Sur. The correlation matrix showed strong correlations ($R > 0.7$, $P < 0.01$) between the series within the same group, providing further justification for separating the two groups.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Chronology

The crossdating process with *Pinus lagunae* was difficult because we had crossdating success for only 25% of the trees, mainly for the large number of intra-annual ring boundaries (false rings). This is not unusual in dendrochronology. Schulman (1956) found similar problems in studying *P. cembroides*, the Mexican pinyon. Many other species that have produced valid annual tree-ring chronologies also have many individual trees whose growth rings are too complex for dating (e.g. *Juniperous virginiana*, *J. scopulorum*, *Pinus edulis*, *Taxodium disticum*, pers. comm. D. Stahle).

A previous study by Biondi and Fessenden (1999) using ^{14}C indicates that there are indeed missing rings and false rings in *P. lagunae*, and consequently they could not assign calendar years to the tree-rings. However, their study was based on only three trees. The current study demonstrates that it is possible to crossdate *P. lagunae* (Fig. 2). The derived chronology is highly correlated with annual rainfall indicating that *P. lagunae* can be used for dendroclimatic studies.

The chronology spans 165 years (1833-1997). This is short by dendrochronological standards. *P. lagunae* is not as long-lived as many other *Pinus* species. Other researchers have reported that *P. lagunae* lives only about 150 years (Pinel, 1985; Díaz, 1995), whereas *P. edulis* Engelm., a species similar to *Pinus cembroides* (Mirov, 1967), lives almost 1000 years in rare instances (Brown, 1996). The inner part of the older trees was difficult to crossdate because the ring boundaries were not clearly visible and they did not exhibit common patterns of wide and narrow rings. Only three trees had datable rings earlier than the 1830s. The mean correlation coefficient between all measured ring width series was 0.41 ($n = 32$, $P < 0.05$), indicating a moderate common growth signal among trees.

4.2. Precipitation reconstruction

None of the climate records from meteorological stations exhibited inhomogeneity. The average correlation coefficient for the seven stations of Sierra de la Laguna was 0.7 ($P < 0.05$) (Díaz *et al.*, 1994). The monthly averaged

data for 1940 to 1996 (57 years) were used with the chronology in the response function analysis (Fig. 3). The precipitation data from September of the previous year through July of the current year was the most appropriate predictand for reconstruction. The precipitation of this grouped months total accounts for 73% of the annual precipitation. Substantial precipitation occurs in the previous fall, winter, and spring before the tree-growth period of May to October (Díaz, 1995), and this moisture is apparently important to *P. lagunae* tree-ring growth. This climate-tree growth pattern involving prior cool season precipitation is commonly found in conifers in temperate zone, semi-arid sites (Fritts, 1976).

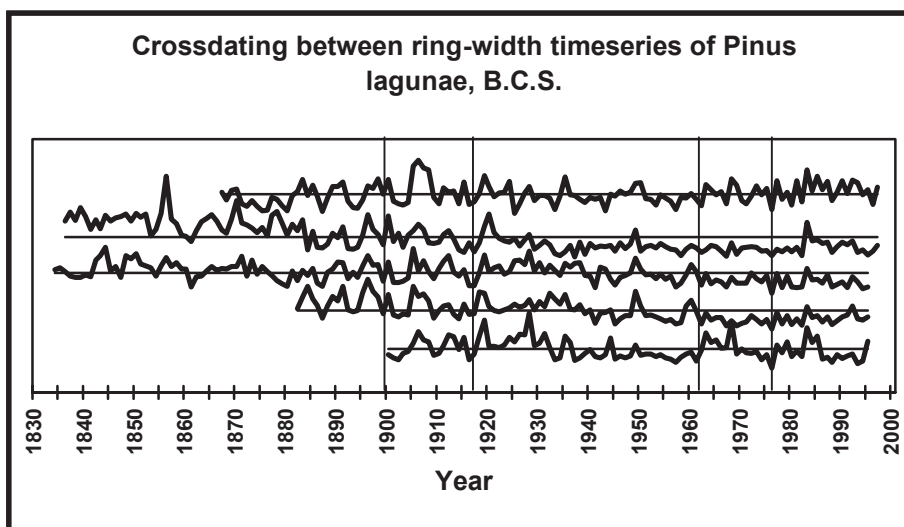


Figure 2. Examples of some annual ring width series of *Pinus lagunae* showing the coherency of the common annual growth pattern.

The meteorological stations from this region reflect a desert climate with summer (July-October) rains. It appears that the heavy summer rains are not as important for tree-ring growth. This may be because the rain falls so rapidly that a large part of the water runs off to the sea (García, 1978) rather than penetrating the soil and benefiting the trees. Winter (November to February) rain comprises only 5% of the annual precipitation (García, 1981), but it is probably important to tree-ring growth because the lower temperatures reduce evaporation, and the rains also tend to occur over longer periods of days and weeks, allowing for moisture to soak into the soil.

The linear regression model between tree-ring indices and precipitation for the 1940 to 1996 calibration period was significant ($F = 55.93$, $P < 0.001$). The model obtained was:

$$Y = -32.1 + 338 X,$$

where Y is September to July precipitation (in mm) and X are the tree-ring index.

Tree-ring indices explain 50 percent of the variance in precipitation (Fig. 4). Cross validation using the

PRESS test (Weisberg, 1985) indicates the model adequately estimates precipitation data not used in the fitted model ($R^2 = 0.46$). Therefore, we used the fitted linear model to reconstruct September to July precipitation back to 1862. Reconstructed precipitation generally matches both the interannual patterns and decadal-scale trends in the observed precipitation time series (Fig. 4). The largest outlier (difference between values observed and predicted by the model was 436 mm) was in 1950, with the observed much higher precipitation than that reconstructed. This difference was probably caused by heavy rains that fell in a few days in September 1949. The rain was caused by a single hurricane in 1949 (NOAA, 1999). Tree growth generally responds poorly to such heavy rainfall because most of the water runs off and is not available to the trees.

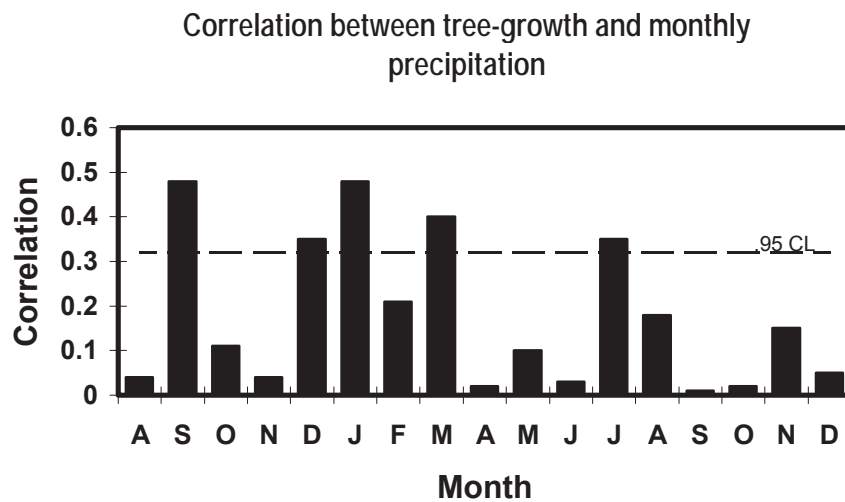


Figure 3. Correlation between tree growth and averaged monthly precipitation data (1939-1996).

The reconstructed precipitation series (Fig. 5) allows us to extend the climatic information 79 years for Baja California Sur. The reconstructed series shows the highest precipitation recorded by the trees was in 1983, which corresponds to a one of strongest El Niño events of the past century. Other extremely wet years that occurred in association with El Niño events were 1905, 1912, and 1919.

Tree-ring reconstruction indicates an epic drought from 1939 to 1958, with only two years of above average reconstructed precipitation. The 1950s drought was severe over Mexico and the Southwest United States (Swetnam and Betancourt, 1998). Our reconstruction suggests that the 1950s drought was a continuation of the event that started in the 1930s in Baja California Sur.

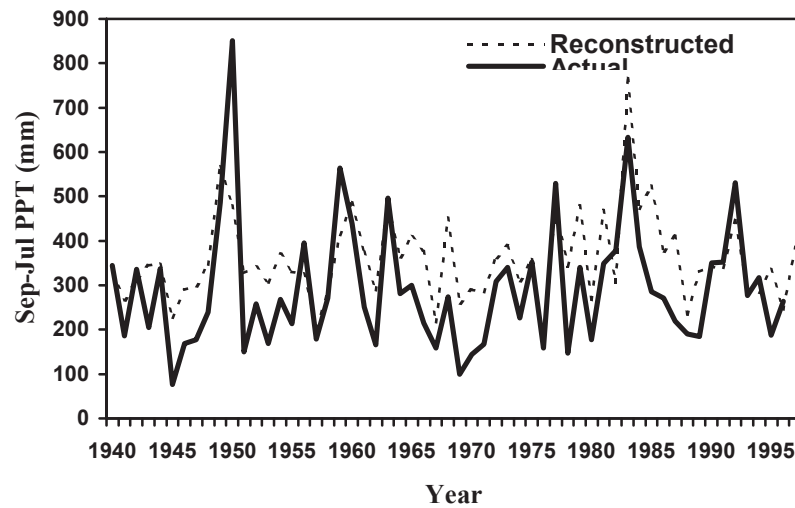


Figure 4. Meteorological stations (solid) and reconstructed (dash) September to July precipitation for Sierra de Laguna, Southern Baja California, Mexico .

The reconstructed precipitation had a moderately low frequency spectrum, with low variance at 2.5-4 years, and high variance at 4-20 years (Fig. 6). The high variance around 5.9 -7.4 years could be an ENSO signal. The dive in variance near zero frequency is probably caused by the standardization procedure (detrending). Meko (1992) found that regional tree-ring (Southwest United States) spectra are generally dominated by low frequency, with 32%-46% of the variance in a 2.8- to 10.2-y ENSO band. Diaz and Pulwarty (1992) found a significant peak at 7.1 years for ENSO warm events from 1882-1935.

4.3. ENSO Analysis

ENSO is considered to be the most important source of interannual climatic variation (Folland et al, 1990;

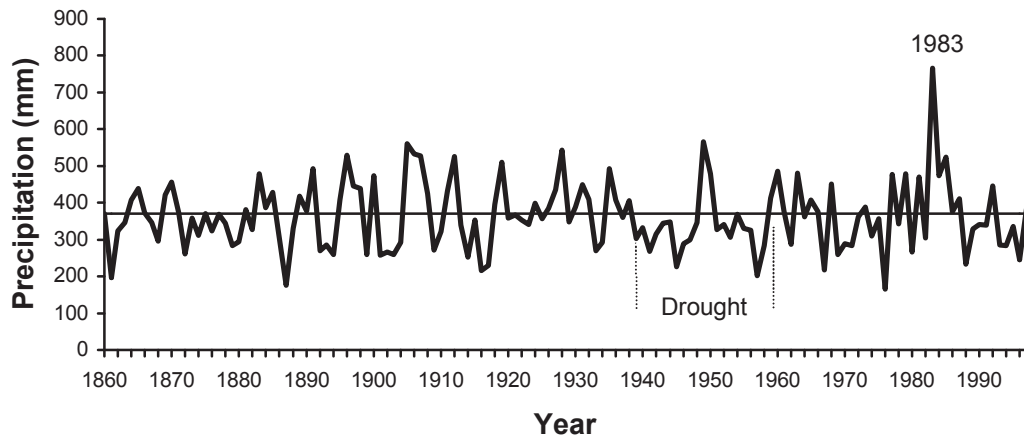


Figure 5. Reconstructed September to July precipitation for Sierra de Laguna, Southern Baja California, Mexico.

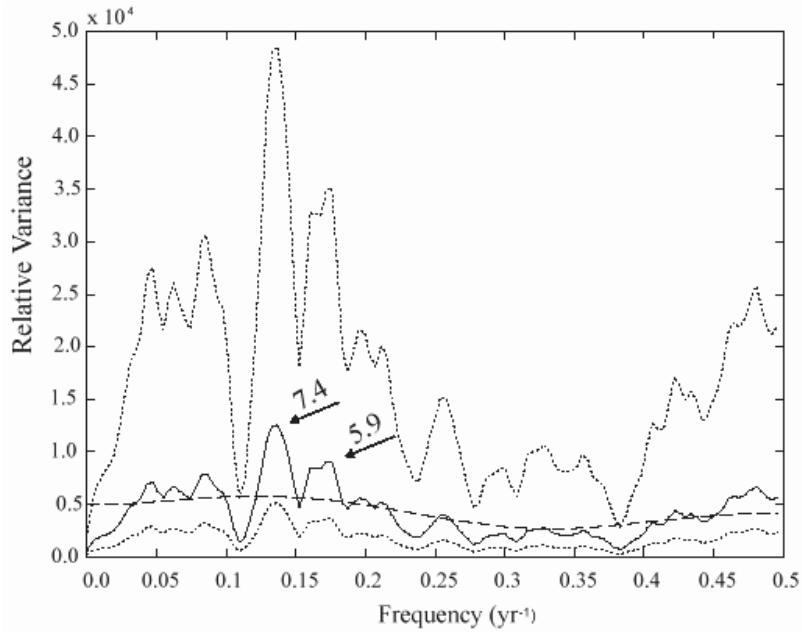


Figure 6. Estimated spectral density of reconstructed September through July precipitation for Baja California Sur, Mexico. The spectrum was estimated by successively smoothing the raw periodogram with a Daniel filter of length seven (solid line). The dotted lines are 95% confidence bands. The dashed line is the null continuum, estimated by smoothing the raw periodogram with Daniel filters of lengths 33 and 55.

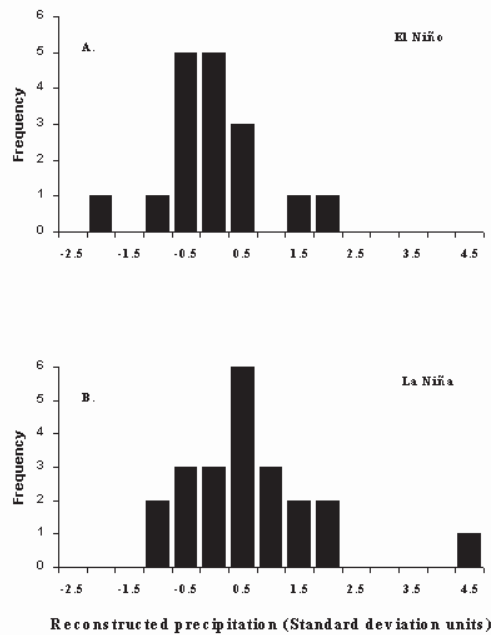


Figure 7. Histograms showing the distribution of: A) wet and dry years during El Niño (warm) events, and B) wet and dry years during La Niña (cold) events.

Stahle and Cleaveland, 1993; Neelin and Latif, 1998). The extreme events of ENSO have significant effects on climate over certain parts of North America, specifically over northern Mexico and the southeastern United States (Cavazos and Hastenrath, 1990). The major reason Baja California is affected by ENSO is that during a warm event (El Niño), the following occur: (1) the warm water source of strong convection in the equatorial Pacific Ocean shifts from the western to the central Pacific (Holton, 1991), (2) this results in an increase of energy input into the subtropical jet stream and an increase of the strength of westerly flow associated with the subtropical jet during the northern hemisphere winter (Rasmusson, 1991; Cayan and Webb, 1992), (3) the Hadley Circulation intensifies, as the Walker Circulation is disrupted and the "normal" easterly winds slacken over the eastern Pacific (Trenberth, 1991), and (4) as eastward traveling Kelvin waves in the equatorial Pacific reach the eastern Pacific, warm water is transported north along the Central American and Mexican coast by northward moving gyres (Cane, 1991). The result of the increased westerly flow and enhanced subtropical jet is an increased transfer of energy, momentum, and moisture in the atmosphere in the latitudinal band of Baja California. Warm water in the eastern Pacific, transported northward along the Central American-Mexican coast, insures that warm moist air is available for enhanced

precipitation along the coast of Mexico. This water is a source of convective energy for eastern Pacific tropical storms, which increase in number during El Niño (Cayan and Webb, 1992).

In comparison with our standardized reconstructed precipitation values, we found that 33% of El Niño events coincided with extreme wet years (>0.5 standard deviation above the mean), and 62% of El Niño events coincided with years of above average precipitation. Only 41% of La Niña events coincided with extreme dry years (<0.5 standard deviation below the mean), but 71% of La Niña events coincided with years of below average precipitation (Fig. 8 A,B). Trees in arid regions are more sensitive to dry than wet years, because the dry years limit the tree ring growth whereas other factors may limit positive growth response in extremely wet years. Therefore, the reconstruction may estimate dry conditions better than wet conditions.

A contingency analysis with Yates' correction yielded the value $\chi^2 = 2.78$ ($P=0.05$). This suggests a non-significant relationship between the El Niño-La Niña events and the reconstructed extreme precipitation events. However, $\chi^2 = 3.98$ ($P = 0.05$) was significant when the El Niño-La Niña events were compared with reconstructed precipitation values below and above the mean.

As in other studies using tree-ring chronologies and meteorological data from Mexico and the southwestern United States, the climate signal best recorded by conifers is winter precipitation (Michaelsen *et al.*, 1989; Stahle and Cleaveland, 1993; Stahle *et al.*, 1999). ENSO has the strongest influence on winter climate in the region. This winter precipitation has a strong effect on subsequent tree growth via recharge of soil moisture (Stahle *et al.*, 1998). The influence of ENSO (both warm and cold events) in the region confirms the studies of Kiladis and Diaz (1993) who found in their Sierra Madre division (including a great part of northwest Mexico) that the winter precipitation is significantly modulated by ENSO.

4.4. Relationship Between the Tree Ring Chronology and Regional Meteorological Station Precipitation Data

Precipitation of northwest Mexico from November to February had the best correlation with the tree-ring chronology, even in areas where summer precipitation is predominant. This apparently reflects the sensitivity of *P. lagunae* to winter rains. The relatively high correlations with the data of many meteorological stations over this large area is most likely caused by broad-scale atmospheric circulation patterns responsible for winter precipitation in northwest Mexico (Stahle *et al.*, 1998).

There are not enough years of recorded precipitation in Sinaloa (1964-1986), and Sonora (1962-1988) to do a reconstruction. But our local reconstruction has an important large-scale signal of precipitation for Baja California Sur, southern Sea of Cortes, and the coastal plain of Sinaloa and Sonora. The spatial pattern of regional precipitation is different compared with the spatial pattern recorded by trees in Chihuahua and Durango, which belong to the Sierra Madre Occidental and central tableland of northwest Mexico (Cleaveland *et al.*, personal communication).

The winter signal for the northern portion of the peninsula is somewhat different from the rest of the region

(Fig. 9), because it is characterized by a Mediterranean climate defined by the classic pattern of the dominant north Pacific anticyclone and an associated west-coast ridge in summer (Comrie and Glenn, 1998). In the middle part of the peninsula, 30% of annual precipitation falls during the winter and the percentage increases to the north (Hastings and Turner, 1965). The 0.5 significant correlation line (Fig. 9) includes parts of Baja California Sur, Sonora, and Sinaloa.

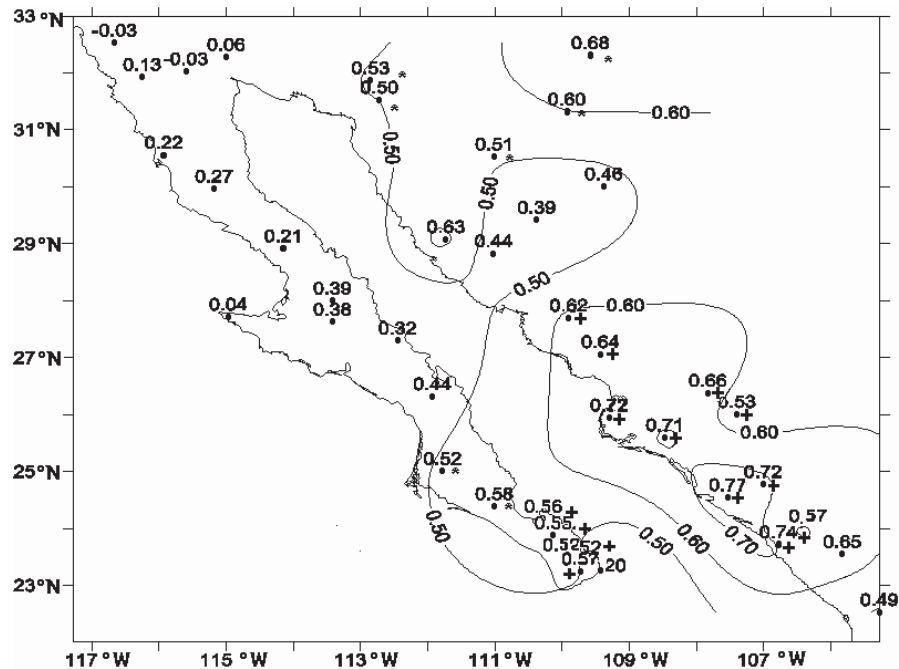


Figure 9. Isoline map of correlation coefficients between winter precipitation and the Sierra de la Laguna tree-ring chronology. Individual meteorological stations are indicated by their correlation with the chronology. The threshold line is the significant correlation of 0.5. Pluses (+) show the series grouped with factor 1, and stars (*) show the series grouped with factor 2.

The highest values of correlation coefficients are in Sinaloa. This line is coincident with the Monsoon and Baja California Sur regions defined by Comrie and Glenn (1998), which have the same rainfall pattern with the summer rainfall peak, but with much less precipitation in Baja California. The peak of rainfall is in September for the monsoon region and in August and September for Baja California, possibly because of increased tropical storms. There are lower correlation values in west central Sonora (Fig. 9). This area is more arid (Salinas-Zavala *et al.*, 1998) and has floristic (Wiggins, 1980), and faunistic (Alvarez-Castañeda *et al.*, 1995) similarities with the peninsula rather than with the surrounding mainland. This pattern may be caused by cool upwelling waters that favor desert conditions (Badan-Dangon *et al.*, 1985).

Summer and fall precipitation is most abundant for almost the whole region. However, summer precipitation

comes from different sources for the different areas and there is a lower spatial coherence of convective rainfall during this season (Stahle *et al.*, 1999). During the summer, the northern peninsula is considerably drier, with the influence of mid-latitude Pacific storms (Hastings and Turner, 1965; Reyes and Mejia-Trejo, 1991). In a great part of Sonora and Sinaloa, summer rainfall mainly comes from monsoon activity (Comrie and Glenn, 1998), whereas tropical perturbations are more important in Baja California Sur and a narrow coastal strip in Sinaloa, with the greatest frequency of rain in September (Rosendal, 1963).

5. CONCLUSIONS

Pinus lagunae has been successfully crossdated and dendrocronologically analyzed. The chronology is strongly correlated with instrumental climate records and provides accurate estimates of the natural precipitation variability over Baja California Sur and coastal plain of Sinaloa and Sonora. The reconstructed precipitation indicates an epic drought from 1939 to 1958. It also shows that 1983, one of the strongest El Niño events of the twentieth century, is the wettest. The reconstruction also indicates the persistence of a winter precipitation signal in the region. Summer-fall precipitation did not show significant correlation with our chronology, probably because the heavy rains result in runoff that is not available for tree growth.

The standardized reconstructed precipitation was sensitive to ENSO events. ENSO has the strongest influence on winter climate in the region. Seventy-one percents of La Niña events coincide with below average precipitation and 62% of El Niño events coincide with above average precipitation.

More tree-ring samples, including other species, such as the oak and dead trees from the Sierra de La Laguna site are needed to increase the length and improve the accuracy of the reconstruction. This may improve the reliability of statistical and spectral analyses. To understand past climate variability in the whole Baja California region, more tree ring samples are needed from northern Baja California, such as Islas Cedros and Guadalupe, and to reunite other paleoclimatic data that can extend the climate regional knowledge. Finally, it is important to investigate the relationship between the tree-ring data and the relationship with other teleconnections or simple variables like sea surface temperature to derive a better knowledge of their effects in the region.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Richard Holmes, Gary Funkhouser, Fenbiao Ni, Gregg Garfin, David Meko, Cesar Salinas, Daniel Lluch-Cota, Dave Stahle, Malcom Cleaveland, and Math Therrel for their advice and suggestions. We would like to thank Chris Baisan for his help in cross dating the samples. Thanks to Dr. Ellis Glazier for editing the English-language text. We also thank Sergio Alvarez and Franco Cota for their valuable field assistance. Funding was

provided by CONACYT (grant No. 94965), Fulbright-Garcia Robles (grant No.22731), and The United States-Mexico Foundation (by a scholarship).

Finally, we would like to thank the Laboratory of Tree-Ring Research for continuous support of this project.

REFERENCES

- Alvarado RD, de Bauer L.I., Galindo AJ. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental Pollution* 80 (2): 115-121.
- Alvarez-Castañeda ST, Salinas-Zavala CA, de Lachica F. 1995. Analisis biogeográfico del noroeste de Mexico con énfasis en la variación climática y mastozoológica. *Acta Zoológica Mexicana*. 66: 59-86
- Anderson RY. 1990. The role of direct observation in predicting climate change. In: J.L. -Betancourt and V.L. Tharp. Eds. *Proceedings of the Seventh Annual Pacific Climate (PACLIM) Workshop. April, 1990*. California Department of Water Resources. Interagency Ecological Studies Program Technical Report 26:137-145.
- Andrade ER, Sellers WD. 1988. El Niño and its effect on precipitation in Arizona and western New Mexico. *Journal of Climatology*. 8: 403-410.
- Arriaga L, Ortega A. 1988. *La Sierra de La Laguna de Baja California Sur*. Publicación No. 1, Centro de Investigaciones Biológicas de B.C.S.
- Arriaga L, Coria R, Bastida-Zavala R. 1992. *La Sierra de La Laguna. Fundamentos para apoyar la creación de una Reserva de la Biósfera*. CIB-WWF. Publicación No. 7
- Badan-Dangon A, Koblinsky CJ, Baumgartner T. 1985. Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta*. 8 (1):13-22.
- Biondi F, Fessenden JE. 1999. Radiocarbon analysis of *Pinus lagunae* tree rings: implications for tropical dendrochronology. *Radiocarbon* 41(3): 241-249.
- Bloomfield P, 1976. Fourier analysis of time series: An introduction. New York. Wiley. 258pp.
- Brown PM. 1996. OLDLIST: A database of maximum tree ages. In: Dean JS, Meko DM, Swetnam TW. eds. *Tree Rings, Environment, and Humanity. Radiocarbon 1996*. Department of Geosciences. The University of Arizona, Tucson: 727-731.
- Cane MA. 1991. Forecasting El Niño with a geophysical model. In Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies edited by Glantz MH, Katz RW, and Nicholls N. Cambridge University Press. 535p.
- Cavazos T, Hastenrath S. 1990. Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*. 10:377-386.
- Cayan DR, Webb R H. 1992, El Niño/Southern Oscillation and streamflow in the western United States. In: Diaz H, Markgraf V.(Eds.). *Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press. 476p.
- Cleaveland MK, Cook ER, Stahle DW. 1992. Secular variability of the Southern Oscillation detected in tree-ring data from Mexico and Southern United States. In: Díaz H, Markgraf V.(Eds). *El Niño: The historical and paleoclimatic record of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press. 271-291.
- Comrie AC, Glenn EC. 1998. Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability.

- Climate Research*. **10**:201-215.
- Cook ER. 1985. *A time series analysis approach to the Tree-Ring standardization*. PhD. Dissertation, University of Arizona, Tucson.
- Cook ER, Kairiukstis LA. 1990. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers. Boston. Massachusetts. 394 pp.
- Díaz HF, Pulwarty RS. 1992. A comparison of Southern Oscillation and El Niño signals in the tropics. In: Díaz H, Markgraf V(Eds). *Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press. 476p.
- Díaz SC, Salinas-Zavala CA, Arriaga L. 1994. An Interannual climatological aridity series for the Sierra de La Laguna, B.C.S., Mexico. *Mountain Research and Development*. **14** (2): 137-146.
- Díaz SC. 1995. *Dinámica poblacional y análisis dendrocronológico de una especie de conífera endémica, Pinus lagunae M._F. Passini de Baja California Sur*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. 105 pp.
- Douglas AV, Englehart PJ. 1981. On a statistical relationship between autumn rainfall in the central equatorial Pacific and subsequent winter precipitation in Florida. *Monthly Weater Review*. **109**: 2377-2382.
- Folland CK, Karl T, Vinnikov K. 1990. Observed climate variations and change. In: *The IPCC Scientific Assessment*, J.T. Houghton, G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums, Eds. *Climate Change*, Cambridge University Press. 194-238.
- Fritts HC. 1976. *Tree-Rings and Climate*. Academic Press. London. United Kingdom. 567 pp.
- García E. 1978. *Apuntes de Climatología*. Larios e Hijos Impresores. Mexico. 151 pp.
- García E. 1981. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen*. México. 251 pp.
- García-Oliva F, Ezcurra E, Galicia L. 1991. Pattern of rainfall distribution in the central Pacific coast of México. *Geografiska Annaler*. **73**: 179-186.
- Hamming RW. 1983. Digital filters. 2nd ed. Englewood Cliffs. N.J.:Prentice-Hall. 257pp.
- Hastings JR, Turner RM. 1965. Seasonal precipitation regimes in Baja California, Mexico. *Geografiska Annaler*. **47A**: 204-223.
- Holton JR. 1991. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press, 511p.
- Huante P, Rincon E, Swetnam TW. 1991. Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bulletin*. **51**: 15-27.
- Kiladis GN, Díaz HF. 1993. ENSO and precipitation variability over Mexico during the last 90 years. *Proceedings of the North Annual Paclim Climate (PACLIM) Workshop*. April 21-24 of 1992. California Department of Water Resources. Interagency Ecological Studies Program Technical Report **34**: 63-70 .
- Kohler MA. 1949. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **82**: 96-97.
- Leon de La Luz JL, Dominguez-Cadena R. 1989. Flora of the Sierra de La Laguna, Baja California Sur, Mexico. *Madrño*. **36** (2): 61-83.
- Lough JM, Fritts HC. 1985. The Southern Oscillation and tree rings: 1600-1961. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. **24**:952-966.
- Lough JM. 1992. An index of the Southern Oscillation reconstructed from western North American tree-ring

- chronologies. In: Díaz HF, and Markgraf V (eds.). *El Niño: Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press. 215-226.
- Maya DY. 1988. Edafología. In: Arriaga L. and Ortega A. (Eds.). *La Sierra de La Laguna de Baja California Sur*. Publicación No. 1, Centro de Investigaciones Biológicas de B. C.S.
- McPhaden MJ. 1999. Genesis and Evolution of 1997-1998 El Niño. *Science*. **283**: 950-954
- Meko DM, Stockton CW, Blasing TJ. 1985. Periodicity in tree rings from Corn Belt. *Science* 228(4711):381-384.
- Meko DM. 1992. Spectral properties of tree-ring data in the United States Southwest as related to El Niño/Southern Oscillation. In: Díaz H, Markgraf V. (Eds.). *Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press, 476p.
- Mercado GMC. 1993. *Características estructurales y banco de semillas de claros formados por la caída natural de árboles en el bosque de encino-pino de Baja California Sur, México*. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Mexico. 71 pp
- Metcalf SE. 1987. Historical data and climatic change in Mexico: A review. *Geographical Journal*. **153**: 211-222.
- Michaelsen J. 1989. Long period fluctuations in El Niño amplitude and frequency reconstructed from tree-rings. In: Peterson DH. ed. *Aspects of Climatic Variability in the Pacific and Wester Americas*. Geophysical Monography. **55**:69-74.
- Mirov NL. 1967. The genus *Pinus*. The Ronald Press Company. New York. 602 pp.
- Neelin JD, Latif M. 1998. El Niño dynamics. *Physics Today*. December. 32-36.
- NOAA. 1999. Ftp.nhc.noaa.gov/pub/storm_archives/pacific/.
- O'Hara SL, and Metcalfe SE. 1995. Reconstructing the climate of Mexico from historical records. *The Holocene* **5**:486-490.
- Passini MF. 1987. The endemic pinyon of Lower California: *Pinus lagunae* M.-F. Passini. *Phytologia*. **63** (5): 337-338.
- Paulhus JLH, Kohler MA. 1952. Interpolation of missing precipitation records: *Monthly Weather Review*. **80**:129-133.
- Pinel N. 1985. La formación de *Pinus cembroides* var. *Lagunae* en la Sierra de La laguna, B.C.S. Mexico. *Informe realizado para obtener el D.E.A. de Ecología en el Centro de Investigaciones Biológicas de La Paz*.
- Rasmusson EM. 1991. Observational aspects of ENSO cycle teleconnections. In: Glantz MH, Katz RW, Nicholls N. (Eds). *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies*. Cambridge University Press. 535p.
- Reyes S, Mejía-Trejo A. 1991. Tropical perturbations in the eastern Pacific and the precipitation field over north-western Mexico in relation to the ENSO phenomenon. *International Journal of Climatology*. **11**: 515-528.
- Rosendal HE. 1963. Mexican west coast tropical cyclones, 1974-1961. *Weatherwise*. **16**:226-229.
- Rueda FS. 1983. *Reconstrucción de la precipitación en las costas noroccidentales de México a través de información dendrocronológica*. Tesis de Maestría en Ciencias Pesqueras. Centro Interdisciplinario de Ciencias del Mar. Instituto Politécnico Nacional.
- Rzedowski J. 1978. *Vegetación de México*. Editorial Limusa. México.
- Salinas-Zavala CA. 1995. *La aridez en el noroeste de México. Un análisis de su variabilidad en función de la condición térmica oceánica*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias UNAM.
- Salinas-Zavala CA, Lluch-Belda D, Hernandez-Vazquez S, Lluch-Cota DB. 1998. La aridez en el Noroeste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmosfera* **11**(1): 29-44 pp.
- Schulman E. 1956. *Dendroclimatic changes in Semiarid America*. University of Arizona Press, Tucson. 142 pp.

- Scott SD. 1963. *Tree-ring dating in Mexico*. Ph. D. dissertation, University of Arizona, Tucson.
- Scott SD. 1966. Dendrochronology in Mexico. *Papers of the Laboratory of Tree-Ring Research*. Paper No. 2. The University of Arizona Press. Tucson. 80 pp
- Shreve F. 1942. The desert vegetation of North America. *Botanical Review*. 8:195-246.
- Stahle DW, Cleaveland MK. 1993. Souther Oscillation extremes reconstructed from tree rings of the Sierra Madre Occidental and southern great plains. *Journal of Climate*. 6 (1):129-140.
- Stahle DW, D=Arrigo RD, Krusic PJ, Cleaveland MK, Cook ER, Allan RJ, Cole JE, Dunbar RB, Therrell MD, Gay DA, Moore MD, Stokes MA, Burns BT, Villanueva-Diaz J, and Thompson LG. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2137-2152.
- Stahle DW, Cleaveland MK, Therrell MD, and Villanueva-Diaz J. 1999. Tree-Ring reconstruction of winter and summer precipitation in Durango, Mexico, for the past 600 years. *10th Symposium on Global Change Studies, 10-15 Jan 1999, Dallas, TX*. T.R. Karl, Program Chairman. Boston, MA: American Meteorological Society. 317-318.
- Stokes MA, and Smiley TL. 1968. *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press.
- Swetnam TW, Baisan CH. 1996. Fire histories of montane forest in Madrean Bordeland. *In: Trenberth KE. 1991. General characteristics of El Niño-Southern Oscillation. In Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies*. edited by M.H. Glantz, R.W. Katz and N. Nicholls, Cambridge University Press, 535p.
- Swtnam TW, and Betancourt JL. 1998. Mesoscale Disturbance and Ecological Response to Decadal Climatic Variability in the American Southwest. *Journal of Climate*. 11: 3128-3147.
- Trenberth KE. 1991. General characteristics of El Nino-Southern Oscillation, *In Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies* edited by M.H. Glantz, R.W. Katz and N. Nicholls, Cambridge University Press, 535p.
- Villanueva-Diaz J, McPherson GR. 1995. Forest stand structure in mountains of Sonora, Mexico and New Mexico, USA. *In: Deban LF, Gottfried GJ, Hamre RH, Edminster CB*.
- Villanueva-Diaz J. 1996. *Influence of land-use and climate on soils and forest structure in mountains of the Southwestern United States and northern Mexico*. Ph.D. dissertation. The University of Arizona, Tucson. 203 pp.
- Villanueva-Diaz, J. 1998. Tree-Ring chronologies and ENSO in northern Mexico. American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting. Puerto Vallarta Mexico. 64-65.
- Villa-Salas A. 1968. La vegetación forestal en el extremo meridional de Baja California. *Dirección General del Inventario Forestal*. Publ. No. 10. S.A.R.H., México.
- Weisberg S. 1985. *Applied linear regression* (Second Edition). John Wiley, New Yorck, 324 pp.
- Wiggins IL. 1980. *Flora of Baja California*. Stanford University Press. 1071 pp.
- Wigley TML, Briffa KR, and Jones PD. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:201-203.

5. CHIHUAHUA WINTER-SPRING PRECIPITATION RECONSTRUCTED FROM TREE-RINGS, 1647-1992

Sara C. Díaz¹, Matthew D. Therrell², David W. Stahle², and Malcolm K. Cleaveland²

Aceptado en: Climate Research

Abstract

The state of Chihuahua lies in an arid to semiarid zone in the northwestern central plain of Mexico. Its agricultural economy is highly vulnerable to frequent droughts. In this study, we reconstruct winter-spring precipitation from 1647-1992 using six earlywood width chronologies of Douglas-fir from around Chihuahua, Mexico. The tree-ring data explain 56% of the winter-spring precipitation variance in a linear regression for 1949-1992, and there is strong correlation between the tree-ring reconstructed precipitation data and the observed precipitation data not used for calibration ($r = 0.74$; $P < 0.01$). The five driest years in the reconstructed precipitation record were 1974, 1954, 1742, 1980, and 1820 in order of severity, and the longest dry period in the 346-year record lasted about 17 years (1948-1964) during the severe 1950's drought that also affected the southwestern United States. The reconstructed precipitation record has a statistically significant 4-year spectral peak in the El Niño/Southern Oscillation (ENSO) frequency band and is significantly correlated with indices of ENSO (Tropical Rainfall Index, $r = 0.58$; $P = 0.001$). The correlation between the ENSO and Chihuahuan reconstructed precipitation varied in strength when computed for non-overlapping 18 year sub-periods (ranging from $r = 0.43$ to $r = 0.68$), which may reflect changes in the ENSO teleconnection to climate in northern Mexico.

Keywords: Chihuahua, Mexico, reconstructed precipitation, tree-ring chronologies, earlywood, Douglas-fir, ENSO, Tropical Rainfall Index.

1. Introduction

Severe droughts occur frequently in the Chihuahua region which lies in an arid to semiarid zone in the northwest central plain of Mexico, bordered by the Sierra Madre Occidental to the west (Garcia, 2000a). The Chihuahuan climatic area is part of an arid zone that includes the southwestern United States (USA; Schmidt, 1983). The state of Chihuahua has considerable economic importance to Mexico as the nation's leader in raising cattle and sheep and is an important producer of apples, nuts, and timber (INEGI, 1996). The agricultural economy of Chihuahua is highly vulnerable to drought (Garcia, 2000b), and it is important to identify past droughts and estimate the frequency of severe droughts in order to develop plans to deal with future water shortages.

Tree-ring research was first conducted in Mexico by Schulman (1944). Since Schulman's work, there have been several publications on tree ring work in Mexico, mainly from the border lands with the USA, and from the subtropical forests of northwestern Mexico. For example, Villanueva-Diaz (1995), and Villanueva-Diaz and McPherson (1995; 1996), developed climatically sensitive ring-width chronologies and estimated winter-spring precipitation and Palmer drought severity index (PDSI) for the southwestern USA and northwestern Mexico using ponderosa pine (*Pinus ponderosa*) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*).

Stahle *et al.* (1999), reconstructed winter and early summer precipitation in Durango, Mexico, using earlywood (EW) and latewood (LW) chronologies from ancient Douglas-fir, and also reported on the development of tree-ring chronologies from tropical Mexico (Stahle *et al.*, 2000a). Biondi (2001) reported the development of a chronology of *Pinus hartwegii* from the tree-line in Colima, Mexico, and Díaz *et al.* (2001) developed a reconstruction of precipitation variability over the past two centuries in Baja California Sur.

According to several reports, the El Niño/Southern Oscillation (ENSO) can have a strong influence Mexican climate (e.g., Cavazos and Hastenrath, 1990; Kiladis and Diaz, 1993; Flores, 1998; Tiscareño *et al.* 1998), and several studies have used tree-ring chronologies from Mexico to reconstruct indices of the ENSO. For example Lough and Fritts (1985), and Stahle *et al.* (1998) have developed reconstructions of the Southern Oscillation Index (SOI). Tree-ring chronologies from northern Mexico are well correlated with indices of ENSO primarily because winter precipitation and tree growth tend to be abnormally low during cold (La Niña) ENSO events (Stahle *et al.*, 2000a, Díaz *et al.*, 2001). This study presents further information about the history of drought in Chihuahua, and its relationship with ENSO events for 346 years. There are no previous reports using tree-rings to reconstruct the climate of Chihuahua.

1.1 Data

Climatic data

The observed precipitation data used for this study are based on monthly gridded precipitation developed by the Climatic Research Unit at the University of East Anglia (gu23wld0098.dat; Hulme, 1992; Hulme *et al.*, 1998). The Hulme precipitation data has a 2.5° latitude by 3.75° longitude resolution and extends from 1900 to 1998. Data from four grid boxes covering most of Chihuahua (grid-points 4436, 4437, 4532, and 4533) were combined to create a regional average to which the tree-ring data could be compared (Figure 1). The gridded data are based on single station data much of which can be found in the Global Historical Climatology Network (GHCN).

Thiessen polygon weights were used to average gauge data within each grid box. Stations could only contribute to these gridded data if they possessed 75% or more valid monthly measurements in the reference period. When a monthly station value was missing, an estimate was obtained by calculating the mean anomaly for that location derived from a maximum of the 50 nearest stations (Hulme *et al.*, 1998). Monthly precipitation is well correlated between the four boxes (r ranges from $r = 0.68$, $p < 0.0001$ to $r = 0.92$, $p < 0.0001$).

These gridded precipitation data were used rather than single station data because of the difficulty involved in creating a regional precipitation average from the available data. Mexican station data is often short and discontinuous especially in the early 20th century, and after the financial crisis of the 1980's. The Hulme data set does smooth out the dramatic spatial gradients that can occur in some years across the complex topography of Chihuahua. But the regional average of the four grid points does provide a very reasonable history of the sequence of drought years and wet years for the state of Chihuahua. This is borne out by comparison with climate data from Chihuahua and surrounding regions (e.g., Garcia, 200b; Stahle and Cleaveland, 1988; Stahle *et al.*, 1999), and by comparison with the six exactly-dated tree-ring chronologies from the region (see below).

Tree-ring data

Six long EW width chronologies of Douglas-fir from Chihuahua and Durango were used for this study (Figure 1). These EW chronologies range from 347 to 603 years in length and are well correlated with winter and spring precipitation (Cleaveland and Stahle, 1996; Stahle *et al.*, 1998; 1999). Douglas-fir in northwestern Mexico typically produce a well-defined boundary between the light colored earlywood laid down in spring and the darker, more dense latewood that grows in the early-to mid-summer. These two seasonal components of the annual ring can be measured with precision and repeatability using methods described by Stahle *et al.* (2000a).

Tree ring samples used to develop the chronologies were collected by the University of Arizona Laboratory of Tree-Ring Research and by the University of Arkansas Tree-Ring Laboratory (e.g., Stahle *et al.*, 2000a). The Douglass method of cross-dating was used to exactly date the growth rings on core samples

extracted from over 300 trees at the six Douglas-fir collection sites. In this method the samples are examined under a binocular zoom microscope and compared with other samples to identify a common pattern among the sample tree-ring series. The skeleton plot, an aid to cross-dating, is a graphic representation of the tree-ring data. It can be used to identify missing rings and false rings, and in this way, synchronize the ring series and give an exact date to each tree-ring. (e.g., Stokes and Smiley, 1996)

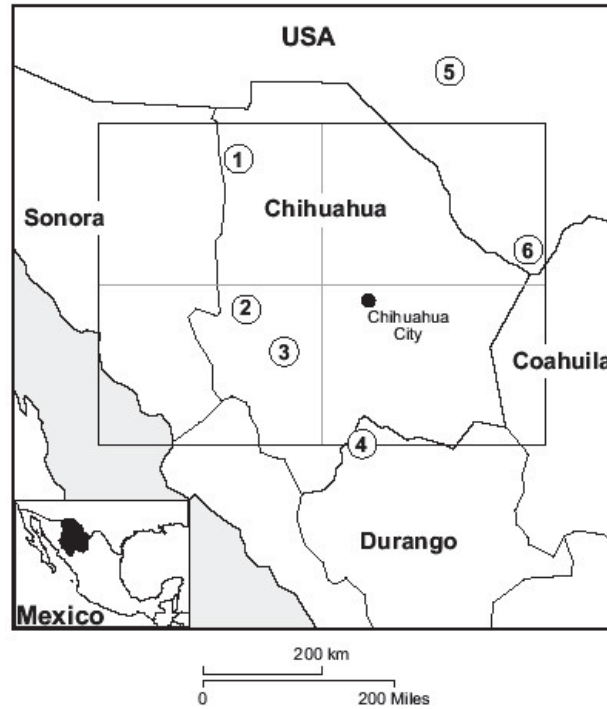


Figure 1. The tree-ring chronologies used for the reconstruction are indicated with numbered circles. The four Hulme (1992) precipitation data set grid boxes and their centerpoints used to develop the regional precipitation average are also shown.

Cross-dating was checked using the computer program COFECHA which utilizes cross-correlation analysis to identify potential dating and/or measuring mistakes (Holmes, 1983). The individual chronologies were created using the computer program ARSTAN which uses curve fitting to remove age-related growth trends and stand dynamic effects (Cook, 1985). The resulting standardized ring-width indices all have a single site chronology using a robust mean value function that discounts statistical outliers. All six EW chronologies exhibit excellent chronology statistics (Fritts, 1976), including high mean sensitivity, and mean inter-series correlation (RBAR). Each chronology can be obtained online from the National Geophysical Data Center (<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo>).

2. Methods

We used principal component analysis (PCA) to identify orthogonal modes of tree growth that represent most of the variance in the array of the six tree-ring chronologies in and near Chihuahua. The first principal component (PC1) explains 65% of the variance in EW tree growth and is significantly correlated with winter-spring precipitation (November through May; Figure 2). Experimentation indicated that a seasonalization of the precipitation data from November through April was optimal to maximize correlation with the factor scores on the first PC of EW growth.

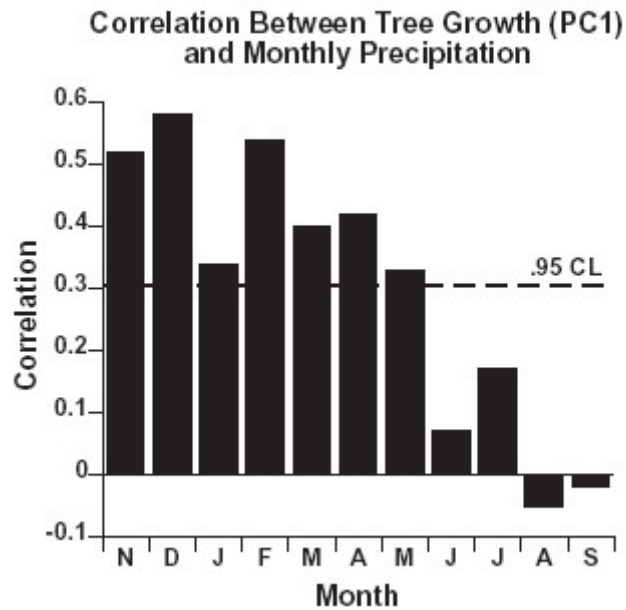


Figure 2. The first principal component of the earlywood chronologies is significantly correlated with regional precipitation for Chihuahua from November through May (confidence level = 0.95). Although precipitation during this period only accounts for about a third of the annual total, correspondingly low potential evaporation rates during this season make it important for soil moisture recharge and plant growth.

While winter-spring precipitation only accounts for a small portion of the annual precipitation (one-third), it can be an important source of water for agricultural activities and native vegetation because evaporation rates during this cool season are low and soil moisture recharge can be high. This is also the season when ENSO influences Chihuahuan precipitation and tree growth most strongly (Cavazos and Hastenrath, 1990; Stahle and Cleaveland, 1993).

Autoregressive (AR) modeling was used to identify any significant time series persistence in the EW PC1 factor scores and precipitation data prior to calibration. Both predictor and predictand proved to be white noise processes (AR-0) using Schwarz's Bayesian Criterion (Schwarz, 1978; SAS Institute Inc., 1993).

Furthermore, neither the regional average of winter-spring precipitation nor the EW PC1 factor scores depart significantly from a normal distribution.

Precipitation data were divided into two parts (1901-1948 and 1949-1992). The latter half was used to develop a bivariate regression model to calibrate the EW PC1 time series with November-April precipitation, and the first-half was used for independent verification of tree-ring estimates of precipitation. We also performed spectral and cross-spectral analysis on the series to test the relationship between the observed and reconstructed series in the frequency domain (Jenkins and Watts, 1968). The spectral power estimates were smoothed with a Hamming window (IMSL, 1982).

3. Results

PCA revealed a strong region-wide growth signal in the EW chronologies, which is clearly due to common climatic forcing. All six chronologies load strongly on PC1, which explains 65% of the variance in the covariance matrix computed between the six chronologies. The annual time series of PC1 factor scores extends from 1647-1992, and was used as the predictor in the equation to reconstruct precipitation in Chihuahua. The regional tree-ring chronology (PC1 of EW width) was regressed against the Chihuahua winter-spring precipitation data (November-April) for the period 1949-1992 (Figure 3). Linear regression using the precipitation data and PC1 shows that the tree-ring data explain 56% of the variance in winter-spring precipitation (R^2 adjusted for loss of two degrees of freedom; Draper and Smith, 1981). The calibration equation for 1949-1992 was:

$$Y_t = 91.611 + 18.721 X_t \quad (1)$$

where, Y_t is the estimated winter-spring precipitation (mm) and X_t is the tree-ring factor score (PC1), both for the year t . No significant autocorrelation was detected in the residuals from the regression model, using the Durbin-Watson statistic (Draper and Smith, 1981), which indicates that the calibration model has no large and systematic unexplained error.

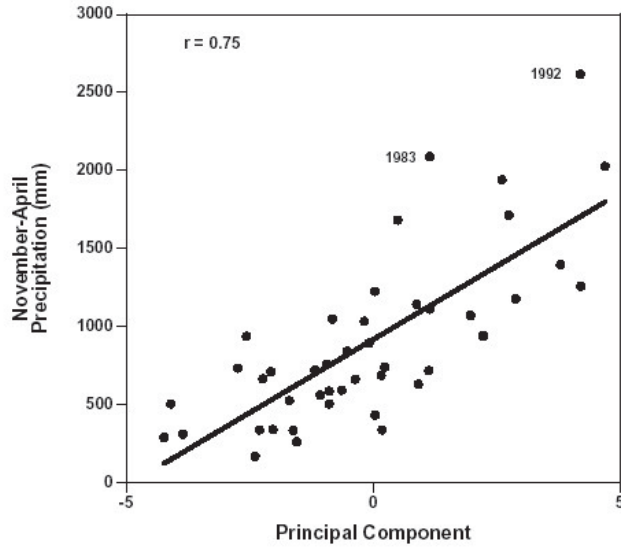


Figure 3. Linear regression was used to calibrate the tree-ring chronology and winter-spring precipitation (Nov-Apr) between 1949-1992. The two largest errors coincide with the El Niño events of 1983 and 1992. Tree-ring records sometimes fail to register abnormally wet episodes with the same fidelity as they record drought (Fritts, 1976).

To validate the regression model, the estimated values for 1901-1948 were compared against independent precipitation data (1901-1948) that was not used in the calibration (Figure 4). The verification statistics include the Pearson correlation coefficient ($r = 0.74$, $P < 0.01$) and the Pearson correlation coefficient after first-difference transformation of series ($r = 0.79$, $P < 0.01$). This procedure tests the strength of the relationship between the observed and reconstructed series when low-frequency variance has been removed by the first differencing transformation (Fritts *et al.*, 1990).

The paired Student's *t*-test between the instrumental and reconstructed means indicate that the means do not differ significantly for 1901-1948 (Steel and Torrie, 1980). The sign test indicates general agreement in sign for the reconstructed and observed deviations from the instrumental means (36 same/12 different, $P < 0.01$; Fritts *et al.*, 1990). The reduction of error test ($RE = 0.57$) indicates high skill in the reconstruction, and suggests that approximately equal fractions of instrumental precipitation variance are reproduced by the tree-ring data during the calibration and verification sub-periods of the 20th century. These results indicate that the tree-ring data accurately reproduce the mean and variance of independent winter-spring precipitation during the validation period.

Close examination of Figures 3 and 4 reveals that the biggest difference between reconstructed and observed values occurred in 1983 and 1992. During these two years, tree growth responded poorly to abnormal wetness. The poor estimate of 1983 precipitation stands out because 1982-1983 was one of the strongest ENSO

events of the 20th century. This difference may be the result of a skewed distribution of 1982-1983 precipitation over the November-March season in Chihuahua. Precipitation during March 1983 was 46 mm, which is more than 200% of the historical average for that month (1901-1992). This incredible event is not well reflected in the EW growth of Douglas-fir in the region perhaps because of the uneven distribution of heavy rain during the winter-spring period.

Using the model derived in the calibration (Eq. 1), winter-spring precipitation was reconstructed for the Chihuahuan region back to 1647 (346 years, Figure 5). The tree-ring estimates suggest that the five driest years in the 346-year winter-spring reconstruction were 1974, 1954, 1742, 1980, 1820, in order of severity. Three of the five worst winter-spring drought years in the past three and a half centuries are estimated to have occurred during the 20th century.

We fit a 10-year smoothing cubic spline (Cook and Peters, 1981) to the reconstruction and observed long periods of below-mean precipitation. The longest drought indicated by the smoothed reconstruction lasted 17 years (1948-1964). Observed precipitation was also below the mean for most years from 1943-1966 (Figure 5). This result is in accordance with work by García (2000b) who reported that the drought of 1952-1957 was the most severe of the 20th century in the Chihuahua area. In addition, a tree-ring reconstruction for Durango, Mexico, by Stahle *et al.* (1999) indicates that the worst drought of the 20th Century occurred from 1950-1965, when 14 out of 16 years had below average winter precipitation. Stahle and Cleaveland (1993), also found that the most severe prolonged drought during the past 300 years in south-central Texas occurred during the 1950s, and work by Díaz *et al.* (2001) indicates that a drought from 1939 to 1958 occurred in southern Baja California, Mexico.

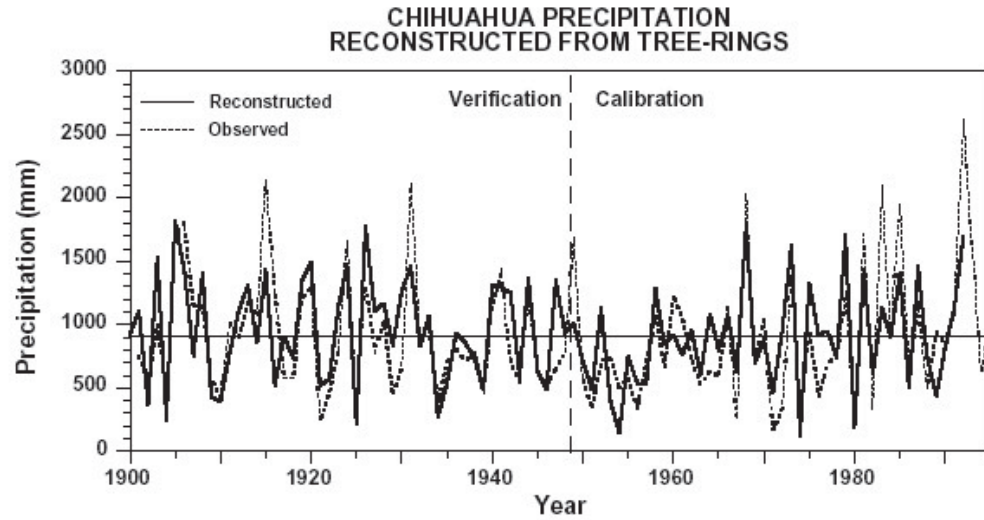


Figure 4. The reconstructed (solid line) and observed precipitation (dashed line) for the calibration and verification periods. The observed and reconstructed precipitation are generally well correlated during the 20th century, but note that several wet years such as 1983 and 1992 are poorly replicated by the tree-ring record.

The second longest drought in the smoothed Chihuahua reconstruction lasted for 15 years from 1751 to 1765. This drought is also apparent in the winter precipitation reconstruction from Durango (Stahle *et al.*, 1999), and to some extent in tree growth and reconstructed PDSI in south Texas (Stahle and Cleaveland, 1988; Therrell, 2000). In addition, Molina (2000) notes that drought induced famine occurred at the beginning of this period in central Mexico.

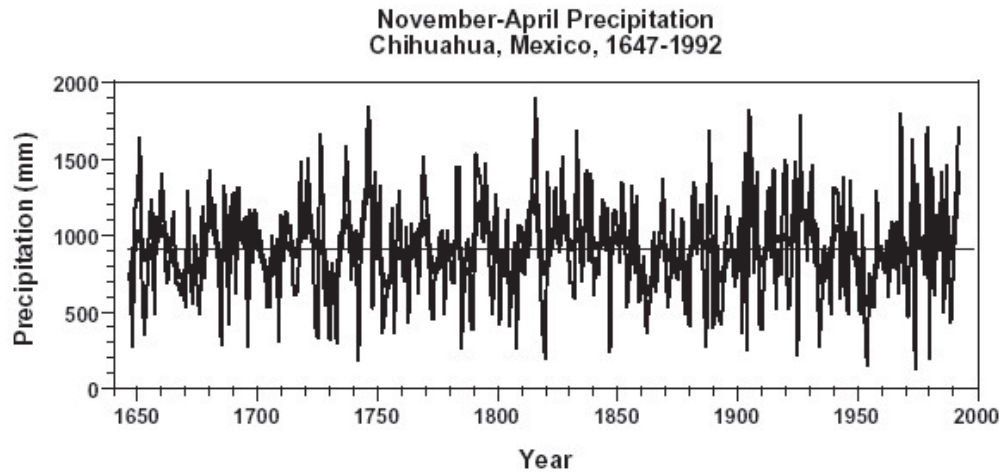


Figure 5. Reconstructed winter-spring precipitation from 1647 to 1992. A smoothing spline was applied to emphasize the decadal variance in the reconstruction (Cook and Peters, 1981), and clearly shows the severe 1950's drought that impacted much of Mexico and the southwestern USA. The long drought at the turn of the 19th century has been implicated in the unrest that led to the Mexican War of Independence (e.g. Florescano, 1969; Florescano and Swan, 1995).

Florescano and Swan (1995) note that just prior to the Mexican war of independence in 1810 there was increased social discontent in northern and central Mexico due to high corn prices, drought, and famine. The Chihuahua reconstruction indicates that a 13-year drought occurred from 1798-1810. This important event is also reflected in climate reconstructions from Durango (Stahle *et al.*, 1999), and Texas (Stahle and Cleaveland, 1988), and tree-ring chronologies from central Mexico (Therrell *et al.*, 2002). A 14-year drought from 1664-1677 is apparent in the Chihuahua reconstruction, but this event may have been more localized because it does not appear to have strongly impacted Durango (Stahle *et al.*, 1999).

Long periods with high winter-spring precipitation were reconstructed for during the late 18th and early 19th centuries, and from 1905-1932 (Figure 5). The early 20th century wet period is particularly interesting as this "pluvial" is apparent in tree-ring chronologies in northwestern Mexico and across the western United States (Stahle *et al.*, 1999; Fye *et al.*, 2002).

Analyzing the Chihuahua series using spectral analysis (Jenkins and Watts, 1968) indicates that the reconstructed winter-spring precipitation (1647-1992) has a significant concentration of variance (4.5%) at 4 years ($P < 0.05$), which appears to be the principal frequency at which the ENSO phenomenon influences winter-spring precipitation over northern Mexico (Figure 6; Cleaveland *et al.*, 1992).

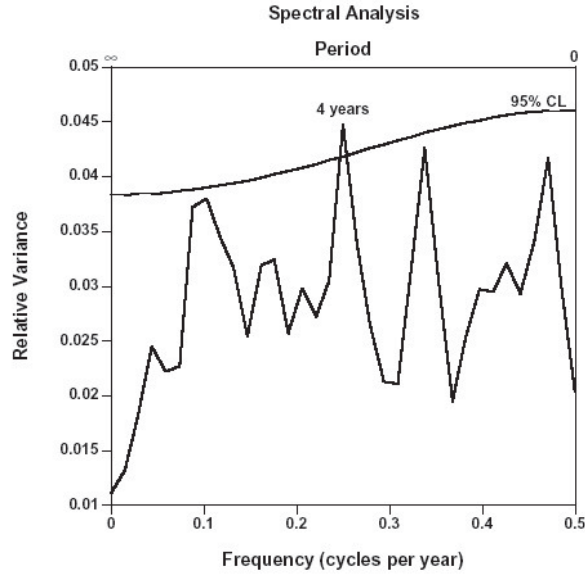


Figure 6. Spectral analysis of the reconstructed precipitation for the period 1647 to 1992 shows a significant peak at 4 years suggesting that El Niño influences earlywood tree growth in this region.

The plot of the coherency squared coefficient from a cross-spectral analysis shows that the instrumental and reconstructed precipitation data are coherent at most frequencies during the instrumental period (1901-1992; Figure 7). This is equivalent to the squared correlation coefficient in the frequency domain. In addition, both time series are in phase at all frequencies.

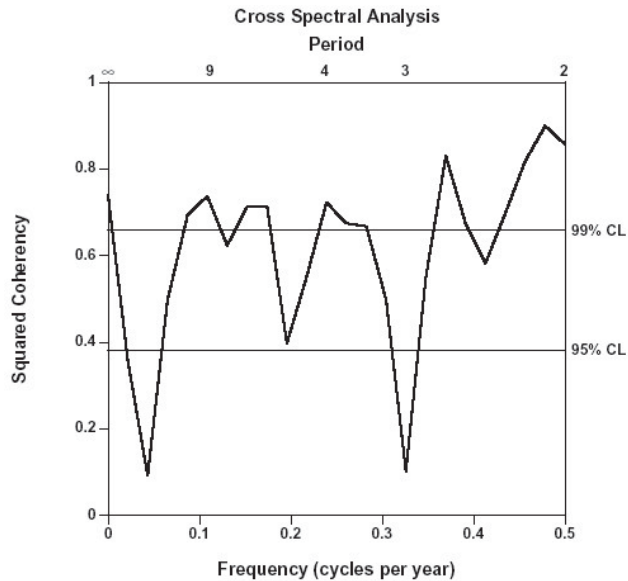


Figure 7. Squared coherency between observed and reconstructed precipitation, 1901-1992. The two series are significantly coherent across most frequencies ($P < 0.05$).

To study the ENSO teleconnection to Chihuahua precipitation, we calculated the correlation between the Tropical Pacific Rainfall Index (TRI, Wright, 1982) and reconstructed precipitation from 1895-1992. The two series are significantly correlated for the entire time period ($r = 0.58$; $P < 0.001$; Figure 8). However, the stability of the teleconnection appears to have varied over time, as has been demonstrated for the United States by Cole and Cook (1998). During five non-overlapping sub-periods of 18 years from 1901 to 1992, the correlation between the TRI and Chihuahua reconstructed precipitation varies from $r = 0.50$ to 0.66 . The relationship between the TRI and observed November-April precipitation also varies over time, ranging from $r = 0.32$ to 0.67 (Figure 9). The correlation between the TRI and both the reconstructed and observed data generally diminish over the 20th century, particularly for the instrumental precipitation data (Figure 9).

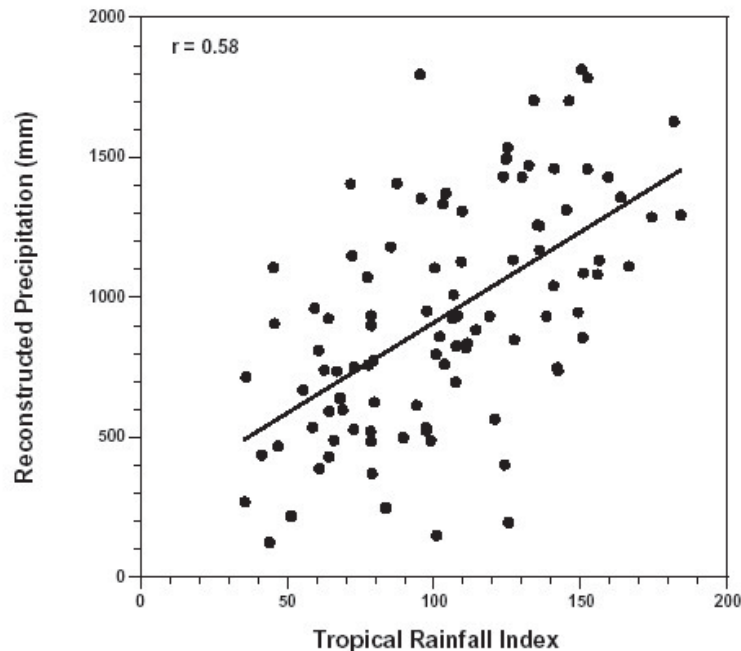


Figure 8. Scatter plot showing the correlation between the Tropical Rainfall Index (TRI; an ENSO index; Wright, 1982) and tree-ring reconstructed precipitation over Chihuahua, 1895-1992. Other ENSO indices show a similar though weaker relationship to the reconstruction.

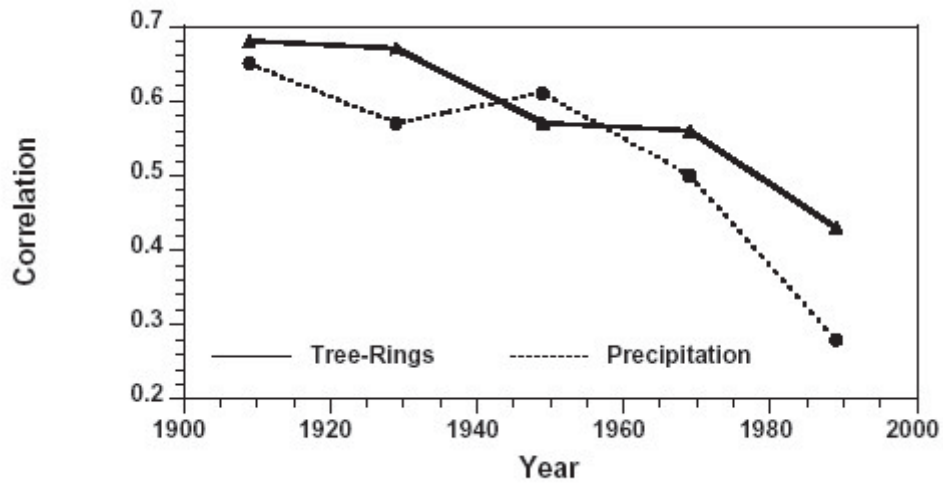


Figure 9. The correlation between the TRI and observed (dashed line) and reconstructed precipitation (solid line) in non-overlapping 18 year periods during the 20th Century (1901-1992; the last period is 20-years long).

4. Conclusions

Research using six Douglas-fir EW width chronologies has provided the first high-resolution precipitation reconstruction reported for the region centered on Chihuahua, Mexico. The reconstruction strongly replicates the instrumental precipitation data during the 20th century, and provides reliable estimates of November-April total precipitation from 1647 to 1992. The winter-spring precipitation reconstruction is coherent with the instrumental precipitation data at most frequencies, and has statistically significant 4 year spectral peak in the ENSO frequency band. The instrumental and reconstructed precipitation data are both significantly correlated with ENSO indices during the 20th century, but the strength of the teleconnection varies on decadal timescales.

The reconstruction suggests that the prolonged drought of the 1950s was the most severe sustained drought over Chihuahua during the past 346 years. These results are in general agreement with other tree-ring research in Mexico and the southwestern USA which suggest that the 1950's drought was among the worst to afflict northern Mexico and the southwestern USA in the past 350 years. However, the reconstruction clearly indicates that droughts of five to ten-years duration are part of the natural variability of winter-spring precipitation over Chihuahua. Historical research by Florescano (1969) and others suggests that some of these past drought episodes were not confined to Chihuahua, and may have had an important influence on Mexican history.

6. Acknowledgements

This research was supported in part by CIBNOR and the U.S. National Science Foundation, Paleoclimatology Program (grant No. ATM-9986074). We thank the Tarahumara People for permission to sample ancient Douglas-fir trees. We also thank B.T. Burns, Ira Fogal, David Meko, and Jose Villanueva-Diaz for assistance and advice.

7. References

- Biondi, F (2001) A 400-year tree-ring chronology from the tropical treeline of North America. *Ambio* 30:162-166.
- Cavazos T, Hastenrath S (1990) Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *Int. J. Climatology*, 10:377-386.
- Cleaveland MK, Cook ER, Stahle DW (1992) Secular variability of the Southern Oscillation detected in tree-ring data from Mexico and Southern United States. *In: Diaz H, Markgraf V (eds) El Niño: The historical and paleoclimatic record of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press, p 271-291.
- Cleaveland MK, Stahle DW (1996) Tree-ring reconstruction of climate extremes using discriminant function analysis. 13th Conf. On Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, American Meteorological Society, San Francisco, CA.
- Cole JE, Cook ER (1998) The changing relationship between ENSO variability and moisture balance in the Continental United States. *Geophys. Res. Lett.*, 25:1529-4532
- Cook ER (1985) A time series analysis approach to tree-ring standardization. PhD Disertation. University of Arizona
- Cook ER, Peters K (1981) The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41:45-53
- Díaz SC, Touchan R, Swetnam TW (2001) A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, Mexico. *Int. J. Climatol* 21(8):1009-1021
- Draper NR, Smith H (1981) *Applied regression analysis (second edition)* John Wiley, New York
- Flores LE (1998) *Geosudcalifornia. Geografía, agua y ciclones*. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México
- Florescano, E (1986) *Precios del maiz y crisis agricolas en Mexico 1708-1810*. Ediciones Era, Mexico City

- Florescano E, Swan S (1995) Breve historia de la sequía en México. Universidad Veracruzana, México.
- Fritts HC (1976) Tree Rings and Climate. Academic Press, San Diego, California
- Fritts HC, Guiot J, Gordon GA (1990) Verification. Methods of Dendrochronology. Applications on the Environmental Sciences. In Cook ER, Kariukstis LA (eds) Kluwer, p 178-185
- Fye F, Stahle DW, Cook ER (2002) Paleoclimatic analogs to 20th century moisture regimes (submitted)
- Garcia AV (ed) (2000a) Estudios históricos sobre desastres naturales en México. CIESAS, Mexico
- Garcia SJ (2000b) Analisis de vulnerabilidad agropecuaria por sequia en el estado de Chihuahua. <http://www.sequia.edu.mx/proyectos/vulnera.html>
- Holmes, RL (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin 43:69-78
- Hulme M (1992) A 1951-1980 Global land precipitation climatology for the evaluation of General Circulation Models. Clim. Dynamics 7:57-72
- Hulme M, Osborn TJ, Johns TC (1998) Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observations with HadCM2 simulation Geophysical Res Letters 25:3379-3382
- IMSL Inc. (1982) IMSL Library Manual, Houston: IMSL Inc. P. FTFREQ-1 to FTFREQ-5
- INEGI. (1996) Anuario Estadístico del Estado de Chihuahua. INEGI-Gobierno de Estado de Chihuahua
- Jenkins GM, Watts DG (1968) Spectral analysis and its applications. Holden-Day
- Kiladis GN, Diaz HF (1993) ENSO and precipitation variability over Mexico during the last 90 years. Proceedings of the North Annual Paclim Climate (PACLIM) Workshop. April 21-24 of 1992. California Department of Water Resources, Interagency Ecological Studies Program Technical Report, 34:63-70
- Lough JM, Fritts HC (1985) The Southern Oscillation and tree rings: 1600-1961. Journal of Climate and Applied Meteorology, 24:952-966
- Molina VA (2000) Aproximación histórica al estudio de los desastres naturales. Siglos XVIII y XIX. In: Garcia AV (ed) Estudios históricos sobre desastres naturales en México. CIESAS. Mexico, 45-52
- SAS Institute Inc. (1993) SAS/ETS User's guide, Version 6.2d. ed SAS Institute Inc.: 890
- Schmidt RH (1983) Climate and the Chihuahuan desert. In: Campos-Lopez E, Anderson RJ, (eds) Natural resources and development in arid regions. Westview Press Boulder, Colorado, 37-52
- Schwarz G (1978) Estimating the dimension of a model. Annals of Statistics, 6:461-464

- Schulman E (1944) Dendrochronology in Mexico. *Tree-Ring Bulletin*, 10:18-24
- Stahle DW, Cleaveland MK (1988) Texas drought history reconstructed and analyzed from 1698-1980. *Journal of Climate*, 1:59-74
- Stahle DW, Cleaveland MK (1993) Southern Oscillation extremes reconstructed from tree rings of the Sierra Madre Occidental and southern Great Plains. *Journal of Climate*, 6(1):129-140
- Stahle DW, D'Arrigo RD, Krusic PJ, Cleveland MK, Cook ER, Allan RJ, Cole JE, Dunbar RB, Therrell MD, Gay DA, Moore MD, Stokes MA, Burns BT, Villanueva-Diaz J, Thompson LG (1998) Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79:2137-2152
- Stahle DW, Cleveland MK, Therrell MD, Villanueva-Diaz J (1999) Tree-Ring reconstruction of winter and summer precipitation in Durango, Mexico, for the past 600 years. 10th Symposium on Global Change Studies, American Meteorological Society, 10-15 Jan 1999, Dallas, TX
- Stahle DW, Villanueva J, Cleaveland MK, Therrell MD, Paull GJ, Burns BT, Salinas W, Suzan H, Fule PZ (2000a) Recent tree-ring research in Mexico. In: Roig FA (ed) *Dendrocronologia en América Latina*. EDIUNC. Mendoza, Argentina, 285-306
- Stahle DW, Cook ER, Cleaveland MK, Therrell MD, Meko DM, Grissino-Mayer H, Watson E, Luckman BH (2000b) Tree-ring data document 16th Century megadrought over North America. *Eos, Transactions Amer. Geophys. Union* 81:121-125
- Steel RGD, Torrie JH (1980) *Principles and procedures of statistics (second edition)*, McGraw-Hill New York
- Stokes MA, Smiley TL (1996) *An introduction to tree-ring dating*. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona
- Therrell, MD, (2000) The historic and Paleoclimatic significance of log buildings in southcentral Texas. *Historical Archaeology*, 34(2):25-37
- Tiscareño LM, Rosenberg NJ, Legler DM, Ruiz A, Shrinivasan R, Brown RA, Medina GG, Velazquez MA, Izaurralde RC (1998) Algunos efectos del fenómeno climático El Niño en la agricultura Mexicana. *Ciencia y Desarrollo*, 139:5-13
- Villanueva-Diaz J (1995) Influence of land-use and climate on soils and forest structure in mountains of the Southwestern United States and northern Mexico. PhD dissertation. University of Arizona, Tucson, 203 pp

Villanueva-Diaz J, McPherson GR (1995) Forest stand structure in mountains of Sonora, Mexico and New Mexico, USA. In: DeBano *et al.* (Technical Coordinators). Biodiversity and Management of the Madrean Archipelago: The Sky Islands of the Southwestern United States and Northern Mexico: 416-123. USDA-Forest Service. General Technical Report RM-GTR-264

Villanueva-Diaz J, McPherson GR (1996) Reconstruction of precipitation and PDSI from tree-ring chronologies developed in mountains of New Mexico, USA and Sonora, Mexico. *Arizona-Nevada Academy of Science, Hydrology Section*, 26:45-54

Wright PB (1982) Homogenized long-period Southern Oscillation indices. *International Journal of Climatology*, 9:33-54.

6. Consideraciones finales.

6.1. Discusión.

Los bosques son dinámicos tanto por su composición, como por su distribución, ya que la historia nos muestra que son conjuntos de especies con límites de distribución móviles como respuesta a cambios climáticos. Cada especie se distribuye independientemente de otra especie, ya sea para escapar de ambientes inhóspitos o para tomar ventaja de los nuevos. Si no puede cambiar su distribución, se adapta; si no se puede adaptar se extingue (Bonnicksen, 2000).

Axelrod (1979) basado en registros fósiles, identificó que esa situación se dio en el noroeste de México, ya que menciona que en el desierto de Sonora existía flora representante de selva, sabana, y bosques que se fueron desplazando hacia el norte de sus posiciones presentes. Los bosques que se presentan en las partes altas de la región, son remanentes de la vegetación existente en el Mioceno. Los taxa que se encuentran ahora en el desierto de Sonora estaban preadaptados en formas de vida y función a la tendencia de incremento progresivo en la aridez que se ha dado desde entonces.

Para la época analizada en este trabajo, los estudios realizados con nidos de *Neotoma spp.* son los que proporcionaron más información histórica de la región noroeste de México, los cuales presentan evidencias de los cambios en la vegetación existente en diferentes épocas. Parte de la razón por la cual este tipo de datos proxy nos ofrece información con una certeza de siglos o milenios se debe a que existe un retraso desde que se presenta el estímulo climático, a que los cambios en la vegetación se manifiesten.

La distribución de los tipos de vegetación esta relacionada con el balance del agua (evapotranspiración anual, déficit anual) lo cual involucra en gran medida la temperatura y la precipitación. La respuesta de la vegetación al clima no es inmediata, ya que las plantas responden a éste como especies individuales basadas en sus requerimientos fisiológicos; pero cuando ocurre un cambio persistente los biomas se reestructuran con diferentes asociaciones vegetales (Gates, 1993).

La información que nos brinda la dendrocronología es de una variabilidad de alta frecuencia comparada con la mayoría de los registros proxy . En el caso de este estudio, por realizarse en latitudes medias el factor que se reconstruye es la precipitación, teniendo más importancia la identificación de la variabilidad de los periodos con precipitaciones menores al promedio, por tratarse de una región con escasez de agua.

- Dendrocronología de *Pinus lagunae*.

El muestreo intenso realizado en el bosque de pino-encino de la Sierra de La Laguna, y el uso de técnicas dendrocronológicas permitieron la obtención de la cronología maestra de *Pinus lagunae* que abarca 165 años. La cronología muestra que el crecimiento de estos pinos es sensible a la precipitación que se presenta desde septiembre del año previo al crecimiento del anillo, hasta la de julio. Es importante mencionar que el periodo de mayor crecimiento del árbol es de mayo a octubre.

Debido a la longevidad de *P. Lagunae* y al número de árboles viejos muestreados, se realizó la reconstrucción de la precipitación (septiembre-julio) de 1862 a 1996. Al comparar la precipitación observada con la calculada se detecta que en general la reconstrucción reproduce tanto los patrones interanuales como las tendencias decadales. Sin embargo, el modelo reproduce pobremente los valores de años muy húmedos. Esto puede deberse al tipo de lluvias torrenciales que se presentan en verano, ya que al caer volúmenes considerables de agua en muy poco tiempo, gran parte del agua escurre hacia el mar sin ser aprovechada por la vegetación además de que cuando el agua ya no es el factor limitante del crecimiento del árbol, otro factor lo limitará. De hecho en los estudios dendrocronológicos la identificación de años en los que el crecimiento es muy poco (anillos muy delgados e inclusive ausentes en ocasiones) son de gran importancia para el fechado correcto de los anillos en las diferentes muestras (Stokes y Smiley, 1996).

Con la reconstrucción se logró aumentar la información climática en más del doble de años, ya que los datos climáticos observados abarcan sólo 57 años. La precipitación mayor registrada por los árboles ocurrió en 1983 que correspondió a uno de los eventos El Niño más fuertes del siglo pasado. Otros años húmedos relacionados con eventos El Niño son los de 1905, 1912 y 1919. En la reconstrucción se observa una sequía prolongada que duró de 1939 a 1958, únicamente interrumpida por dos años con precipitación superior a la promedio, coincidiendo con una sequía severa reportada para el suroeste de Estado Unidos (Stahle *et al.*, 2000), pero que al parecer inició primero en México.

El ENSO es considerado como una fuente importante de variación climática interanual. Para la región noroeste de México su influencia se percibe en el clima de invierno (Diaz y Kiladis, 1992). En la serie de precipitación reconstruida se detectó que el 62% de los eventos El Niño coinciden con años con precipitación mayor a la precipitación promedio de la serie reconstruida, mientras que el 71% de los eventos La Niña coinciden con años con precipitación menor al promedio.

En escala regional se observó que *P. lagunae* refleja sensiblemente la precipitación de invierno que se presenta en Baja California Sur y gran parte de Sinaloa y Sonora, esto es debido a que los patrones atmosféricos de circulación responsables de la precipitación invernal en la región son de escala amplia (Flores,

1998). Esto resulta importante ya que los registros climatológicos en Sinaloa y Sonora son aún menores que para Baja California Sur, iniciando en 1964 y 1962 respectivamente y la reconstrucción de la precipitación nos da indicios de cómo fue la precipitación de invierno 100 años antes de que iniciaran los registros climatológicos.

La parte media y norte de la península de Baja California presenta un clima de tipo Mediterráneo que es diferente al del resto de la región, y esto se observa al relacionar los registros de sus estaciones climatológicas con la cronología.

- Reconstrucción de la precipitación de Chihuahua.

Pseudotsuga menziesii es una conífera que en sus anillos anuales de crecimiento se puede diferenciar con relativa facilidad la madera temprana de la tardía y ya que cada una de estas secciones se forma en una determinada época del año, la información que se puede obtener de su estudio puede ser más específica.

En el proceso de calibración se obtuvo un modelo que explica la variabilidad de la precipitación de invierno-primavera de 1949 a 1972. En la verificación del modelo con datos observados de 1901 a 1948 se obtuvo una correlación significativa al relacionarlos con los datos calculados. Sin embargo se observó que la mayor diferencia entre los valores observados y reconstruidos se da en 1983 y 1992, ambos años muy húmedos en los que los árboles responden solo ligeramente a la humedad registrada.

El modelo obtenido en la calibración se utilizó para hacer la reconstrucción de la precipitación de invierno-primavera a partir de 1647. La estimación basada en los anillos de crecimiento de los árboles sugiere que los cinco años más secos en los 345 años reconstruidos fueron en orden de severidad 1974, 1954, 1742, 1980 y 1820; tres de ellos ocurrieron en el siglo XX.

Los periodos de bajas precipitaciones que se extienden por varios años ocasionan severos daños en las diversas comunidades, por lo que se identificaron en la serie reconstruida y se trató de encontrar si también están reportados en otros tipos de registros. Es importante mencionar que se está hablando de periodos de baja precipitación de invierno-primavera, que no corresponde al periodo de lluvias más abundantes en Chihuahua, puesto que éstas son en verano. Sin embargo el impacto de la precipitación de la temporada fría del año es importante en la biota debido a la forma en que se presentan las lluvias (frontal) que permite que la evaporación sea menor y tanto la penetración del agua al suelo como su utilización por las plantas sea grande.

Entre los periodos de sequías que resaltan las de 1948 a 1964; 1751 a 1765; 1798 a 1810; y de 1664 a 1677. Algunas de los cuales coinciden con reportes de que en esos tiempos hubo carestía y hambrunas que inclusive pudieran haber funcionado como catalizadoras en movimientos sociales como es el de la guerra de la independencia. Desafortunadamente no todos los periodos de sequía se pudieron validar, por la falta de registros históricos.

Sin embargo se puede decir que la frecuencia de las sequías se ha venido incrementando, ya que si se obtiene el porcentaje de años con valores de precipitación menores al promedio histórico (es decir de la serie reconstruida), se tiene que éste ha ido aumentando siendo para el siglo XVIII de 45%; para el siglo XIX de 53% y para el siglo XX de 63%.

La frecuencia dominante en la serie de precipitación reconstruida es de 4 años, que cae en la banda de frecuencia del ENSO y se correlaciona significativamente con el TRI, sin embargo se observa que al realizar las correlaciones por periodos de 20 años la correlación varía de $r = 0.43$ a $r = 0.65$, lo que habla de una variabilidad en las teleconexiones del ENSO en Chihuahua.

- Generalidades

La reconstrucción de la precipitación usando la dendrocronología de la Sierra de La Laguna refleja los cambios en la precipitación de invierno que ocurren en gran parte de la península de Baja California, Sonora y Sinaloa; sin embargo, no se encontró una relación existente con el norte de la Península, ya que ahí el clima es diferente, de tipo mediterráneo y los factores que determinan su precipitación son más bien de tipo local, diferentes al del resto de la región.

Al comparar las series de precipitación reconstruidas, la de La Sierra de La Laguna y la de Chihuahua, se encontró una correlación aunque baja, significativa ($r = 0.39$, $P = 0.05$), identificando en ambas series la influencia del ENSO. De hecho, los eventos La Niña son más aparentes en ambas series, ya que de los eventos reportados por Kiladis y Diaz (1993) 88% de ellos coinciden en Chihuahua, con precipitaciones menores al promedio, mientras que para Baja California Sur es el 71%. Al respecto Flores (1998) menciona en su libro "... de todo México la Península de Baja California es la que muestra la menor señal de precipitación asociada con el ENSO, quizás debido a su condición típicamente desértica.."; también comenta que durante La Niña los efectos son más variados de un sitio a otro.

Por otra parte, la influencia del ENSO en la región se confirma también en los estudios realizados por Pérez (2000) con sedimentos en la Bahía de La Paz, quien encontró que hay una frecuencia de cambios de flujo sedimentario de entre 5 y 7 años, lo que cae dentro del rango de frecuencia reportada para el ENSO.

Existen cronologías realizadas al norte de la península de Baja California, en la Sierra de San Pedro Mártir, con las que se ha reconstruido la temperatura superficial del mar (Douglas, 1980; Biondi *et al.*, 1999), pero no se han hecho reconstrucciones de precipitación. Esas cronologías no presentaron correlación significativa con la de la Sierra de La Laguna. Para analizar si había periodos en los que las correlaciones variaban se hizo un análisis de correlación movido con una ventana de 30 años. Con este análisis se observan cambios en las

correlaciones, variando los valores de 0.32 a - 0.25, distinguiéndose valores negativos de 1900 a 1955, sin embargo las correlaciones nunca fueron significativas ($P > .05$).

A continuación se presenta la matriz de correlación cruzada que se obtuvo al correlacionar las cronologías existentes para el noroeste de México. Las series dendrocronológicas de Baja California, Durango y Sonora fueron obtenidas del International Tree-Ring Data Bank (<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/ftp-treering.html>).

<i>Variable</i>	<i>B.C.</i>	<i>B.C.S.</i>	<i>Sonora</i>	<i>Chihuahua</i>	<i>Durango</i>
B.C.	1				
B.C.S.	-.046	1			
Sonora	-.273	.288	1		
Chihuahua	-.159	.390	.601	1	
Durango	-.029	.366	.408	.795	1

Todas las correlaciones a excepción de las de Baja California, son significantes ($N = 133$, $P < .001$).

En el cuadro anterior resalta, como era de esperarse que las correlaciones más bajas son para Baja California Sur, por que está más alejada del resto de la región; Sonora presenta los valores más altos con las cronologías más cercanas y la correlación entre Chihuahua y Durango es muy alta por que se encuentran compartiendo características geográficas y climáticas. En esta matriz de correlación se observa que la cronología de Baja California se separa del resto de las cronologías al ser sus correlaciones no significantes y por ser las únicas con correlaciones negativas, lo que de alguna forma refleja que en esa área se presenta el clima mediterráneo, diferente al resto de la región.

6.2. Implicaciones para la administración de Recursos Naturales

En las regiones áridas es de suma importancia el estudio de las sequías, ya que su efecto negativo se puede extender más allá del tiempo que dura la sequía. Comúnmente el suministro de agua en estas regiones es muy bajo, cuando éste se reduce aún más, afecta sensiblemente a los recursos naturales de la región y al hombre en varios sentidos, como el económico (pérdidas en la agricultura y la industria relacionada con ella), social (revueltas, migraciones), salud (epidemias) (Salinas-Zavala y Díaz en preparación). De ahí que muchos acontecimientos sociales históricos tengan en su origen relación con sequías (Stahle *et al.*, 1998).

La información que los estudios paleoclimáticos brindan, permite ampliar el conocimiento de la variabilidad, extensión y periodicidad de los eventos climáticos extremos. De esta forma se pueden crear escenarios futuros mediante modelos climáticos predictivos más confiables, lo que le brinda herramientas de conocimiento a los tomadores de decisiones, ya sean políticas o para el manejo adecuado de los recursos naturales mitigando los efectos negativos. El presente trabajo aunque no llega a la parte de los modelos predictivos de periodicidades y tendencias que de por sí pueden ser de utilidad a los administradores de recursos naturales y algunas actividades primarias.

Como ejemplo concreto de la utilidad del conocimiento de la variabilidad climática para los tomadores de decisiones, está el problema que México está enfrentando con E.U. por el reparto de agua de las cuencas que se comparten entre los dos países. En 1944 se firmó un tratado entre estas dos naciones que estipula el reparto de aguas entre México y E.U. de sus ríos transfronterizos. En ese tratado se señala que México entregaría anualmente a E.U. 453 millones de m³ del Río Bravo. Cuando se signó este tratado la información climática disponible era muy limitada, pues sólo unas cuantas estaciones meteorológicas estaban funcionando y mucho menos se tenía conocimientos de la variabilidad climática regional. Durante ese tiempo se estaba pasando por un periodo húmedo (Díaz y Salinas, en preparación), por lo que el volumen de agua convenido parecía adecuado, sin embargo la sequía que se ha presentado en el norte de México desde la década pasada ha hecho que la situación de abasto de agua en esta región sea crítica, pues se tienen reservas sólo para nueve meses (Liñan, 2002) por lo que el adeudo de agua que se ha venido arrastrando con E.U. resulta imposible de cubrir por el momento, por más que los agricultores Texanos así lo demanden.

6.3. Conclusiones

Durante las glaciaciones el nivel medio del mar se disminuye, mientras que en los periodos cálidos aumenta. En el noroeste de México la influencia del mar es directa, sobre todo para la Península de Baja California que durante estos periodos fríos, su extensión se vio incrementada, lo que se ve corroborado por estudios hechos en sedimentos marinos y con fósiles de vertebrados terrestres.

Desde el último máximo glacial (Wisconsin) hace 18,000 años durante el Pleistoceno, ha habido hasta la actualidad periodos alternantes fríos y cálidos de diferente intensidad y duración. Los estudios paleoclimáticos realizados en la región nos dan parte del panorama de cómo han sido los efectos de los cambios climáticos desde finales del Pleistoceno. Esto se debe a que aún son pocos los estudios de este tipo, sin embargo se puede apreciar que los cambios no son tan sencillos como decir periodos fríos o cálidos, sino que involucran cambios en la estacionalidad de las lluvias (lo que modifica la evaporación potencial que es tan importante para las plantas) y su distribución así como las temperaturas promedio y extremas de los meses más fríos y más

cálidos. Estas características son determinantes para definir los tipos de clima y a su vez delimitar la vegetación.

Los estudios paleoclimáticos que se han realizado para la región nos dan información de variaciones climáticas de gran escala que involucran periodos que abarcan siglos y hasta milenios. El conocimiento de las variaciones climáticas ocurridas en la región nos ayuda a entender el tipo de biota que existía anteriormente y por qué se encuentra la actual.

Con los resultados de los estudios dendrocronológicos tenemos información de variaciones climáticas más finas (interanuales, decadales) que se relacionan de manera más evidente con parte de la historia de las sociedades humanas que habitan la región. Sin embargo, debido al tipo de árboles presentes en la región, la información obtenida abarca solamente los últimos siglos, aunque esto no es definitivo pues la búsqueda de registros dendroclimáticos más antiguos continúa (tocones, troncos enterrados, troncos fósiles, especies más longevas, sitios arqueológicas, etc.).

Tratar de extender las cronologías basándose en el estudio de madera utilizada en la construcción de sitios arqueológicos, para Baja California Sur no es posible por la falta de este tipo de construcciones. Aunque existen misiones que datan desde finales del siglo XVII, el material utilizado en su construcción era traído del interior de la república o la madera que utilizaban no era de árboles que forman anillos anuales de crecimiento. Sin embargo para el caso de Chihuahua esto si es posible, ya que hay ruinas arqueológicas como la de Casas Grandes, en donde Scott (1966, citado en Stahle *et al.*, 2000) obtuvo una cronología flotante que va del año 851 a 1336 D.C.

En la reconstrucción de la precipitación efectuada para Baja California Sur (capítulo 5) se observa un periodo de sequía muy prolongado de 1939 a 1958 solamente interrumpido en dos años con precipitación reconstruida superior al promedio. Ese periodo de sequía esta reportado como uno de los más severos de los últimos siglos en Texas y Nuevo México (Stahle and Cleaveland, 1993). Las cronologías analizadas para el noroeste de México (B.C.S., Sonora, Chihuahua y Durango) muestran poco crecimiento de los anillos arbóreos durante varios años, centrado éste periodo en 1955, lo que indica que la sequía abarcó un área enorme. Al realizar reconstrucciones regionales se puede ir integrando un mapa de mayor escala (como continental, hemisférico o mundial) donde se aprecie la extensión del área afectada por una sequía y sus cambios en el tiempo.

El análisis de las series de precipitación reconstruidas reflejó que los periodos de precipitación menor al promedio se han venido incrementando lo que sugiere que las sequías del siglo XX no son inusuales en el contexto de los pasados siglos y las sequías futuras, si se sigue con esta tendencia, podrán ser de mayor duración y mucho más severas de lo que hemos experimentado.

Por otra parte, se pudo corroborar la influencia del ENSO en el clima del noroeste Mexicano, detectándose que a diferencia de otras partes del País, dónde la fase caliente del ENSO se manifiesta en lluvias intensas que producen inundaciones, para el noroeste, la fase fría es la que deja sentir su efecto negativo manifestándose en sequías. Así también, se identificó que las teleconexiones del ENSO han variado en intensidad siendo mayor a principios de siglo que a finales.

Las coníferas de estas latitudes son más sensibles a la precipitación que a la temperatura, como lo hacen las de latitudes mayores, y la reconstrucción de la precipitación se hizo de las lluvias de invierno-primavera, aunque las lluvias predominantes para la mayor parte de la región son las de verano. Sin embargo el conocer la variabilidad de la precipitación de invierno-primavera es importante, ya que nos da indicio de la precipitación anual.

El mismo patrón de variación de lluvias de invierno se pudo identificar en gran parte de la región debido a que, como menciona Flores (1998), "como la lluvia de invierno es traída por un proceso ciclónico de gran escala, existe una mayor relación espacial entre puntos distintos. En cambio, en verano y otoño la variabilidad espacial es mucho mayor por el interjuego de los distintos procesos. La lluvia de verano es más bien de tipo local, en tanto que la de otoño es intermedia entre la de invierno y la de verano".

Es importante mencionar que durante las glaciaciones la distribución de los bosques de coníferas se extendía más hacia las latitudes tropicales y con la elevación de la temperatura mundial éstos bosque se pueden aún encontrar en esas latitudes pero restringidos a las partes elevadas, donde las temperaturas son más bajas. La declinación de los bosques durante años recientes ha sido de gran interés mundial considerando su tala como uno de los factores que ha favorecido el calentamiento global. Sin embargo, la declinación de los bosques no es efecto únicamente antropogénico, el clima juega un papel muy importante en esto (Gates, 1993).

Los resultados de esta investigación ayudan a ir integrando información sobre regiones específicas en el panorama paleoclimático mundial, dónde las regiones tropicales están muy pobremente representadas. Así también, la información generada aquí podrá servir para que los modelos generales de circulación (conocidos como GCM por sus siglas en ingles) sufran reajustes específicos para ser más confiables en sus predicciones. El calentamiento global acelerado que se ha presentado en el último siglo es un hecho indiscutible dado los registros climáticos y con los resultados paleoclimáticos del presente estudio se observa que el efecto en la región ha sido a incrementar la frecuencia de las sequías de invierno.

6.4. Perspectivas de investigación a futuro

Los resultados obtenidos en este trabajo abren un gran abanico de temas a ser estudiados, como puede ser el explicar las condiciones atmosféricas imperantes durante los eventos ENSO en la región (flujos de humedad en

la atmósfera, ubicación de los centros de acción, profundizar en el conocimiento de las teleconexiones en la región).

Por otra parte las coníferas han sido estudiadas con propósitos dendrocronológicos alrededor del mundo, aunque para las regiones tropicales y subtropicales los estudios son muy limitados. En gran medida esto se debe a que las especies tropicales difícilmente forman anillos anuales de crecimiento. México es un país rico en recursos forestales y diversidad de coníferas entre las que se pueden encontrar pinos, encinos, abetos y cipreses; especies que ya han mostrado ser útiles en estudios dendrocronológicos en otros países (Grissino-Meyer, 1993).

La dendrocronología en México podría decirse que esta en fase inicial, pues aunque ya se han realizado varias cronologías hay muy poco material publicado. México tiene un gran potencial dendrocronológico que podrá ser utilizado para ir llenando el hueco de información paleoclimática que existe en las regiones tropicales y que es de gran interés obtenerlo para la comunidad científica internacional pues servirá para entender mejor como se ha dado el cambio climático global.

Las posibilidades de entender diferentes eventos utilizando la dendrocronología es mucha. Estos eventos no se refieren únicamente a aumentar el conocimiento de la variabilidad climática e influencia del ENSO de diferentes regiones que, como ya se dijo, es de gran utilidad para la elaboración de modelos de predicción climática que ayuden a prevenir catástrofes y realizar una adecuada programación de actividades productivas como la agricultura y pesca. Los estudios dendrocronológicos también pueden ser aplicados en los siguientes casos:

- Detectar la frecuencia e influencia de heladas, inundaciones, sequías.
- Hacer reconstrucciones de escurrimientos superficiales, de vientos fuertes, de movimientos tectónicos, o de actividad volcánica.
- Encontrar los eventos paleoclimáticos que pueden haber sido la causa de epidemias, o el ocaso de civilizaciones (como la Maya o Egipcia).
- Analizar la dinámica de los ecosistemas al poder obtener un paleoregistro de incendios forestales.
- Inferir fluctuaciones en la densidad de poblaciones de insectos, aves y mamíferos.
- Detectar el efecto de la contaminación.
- Probar la factibilidad de que otras especies de coníferas endémicas puedan ser útiles en estudios dendrocronológicos. Hago la mención de especies endémicas dado que hay muchas de ellas con las que no se han realizado este tipo de análisis, ya que se distribuyen en latitudes donde los dendrocronólogos no han llegado aún.

En general se puede decir que la dendroclimatología nos ayuda a tener un registro más amplio, con una precisión anual o inclusive estacional, de eventos climáticos extremos que sucedieron en el pasado. La identificación del efecto de tales eventos en la biota, y el conocimiento de la frecuencia histórica con que se han presentado nos dará armas para estar preparados ante eventos futuros.

7. Referencias

- Alvarez CS, P Cortés. 2001. Análisis de la variación de la población de mamíferos pequeños, como respuesta a los cambios de vegetación por el efecto de El Niño en una zona semiárida. En: Escobar B, Bonilla M, Badán A, Caballero M, Winckell A (comps) *Los efectos del fenómeno El Niño en México 1997-1998*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México 216-222
- Ahrens, C.D. 1993. *Essentials of Meteorology*. West Publishing Company. New York. 438.
- Albuquerque AL. 1998. Holocene lake-level change in a tropical lake in southern Brazil, and its limnological consequences. *American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting*. Puerto Vallarta Mexico. 79.
- Anderson RS, TR Van Devender. 1991. Comparison of pollen and macrofossils in packrat (Neotoma) middens: A chronological séquense from the Waterman Mountains of Southern Arizona. USA. *Rev of Paleobotany and Palinology* 68:1-28.
- Anderson RS, TR Van Devender. 1995. Vegetation history and paleoclimates of the coastal lowlands of Sonora México – pollen records from packrat middens. *Journal of Arid Environments*. 30: 295-306.
- Andrews TG. 1996. *Coral Paleoclimatology Natural recorders of interannual climatic variability in the tropical oceans and seas*. World Data Center-A for Paleoclimatology Educational Slide Project. 15 pp.
- Axelrod DI. 1979. Age and origin of Sonoran Desert Vegetation. *Ocasional papers of the California Academy of Sciences*. San Francisco, USA. 74.
- Biondi F, S Bullock, N Martijena, DR Cayan, WH Berger, K Berger. 1999. Dendroclimatology of Pinus jeffrey in Baja California, México. Resúmenes del tercer Simposio Botánico de la Península de Baja California. CIBNOR, Baja California Sur México.16-17.
- Bohle HG, TE Downing, and MJ Watts. 1994. Climate change and social vulnerability toward a sociology and geography of food insecurity. *Global Environmental Change*. 4(1): 37-48.

-
- Bonnicksen, TM. 2000. *America's ancient forests*. USA. John Wiley & Sons, Inc. 594.
 - Bradley RS. 1999. *Paleoclimatology. Reconstructin climates of the Quaternary*. Second Edition. Academic Press. USA. 613.
 - Candel VR, DL Fernández, DN López, F Hernández-Pacheco, D Hernández-Pacheco. 1953. *Historia Natural. Geología*. Instituto Gallach de Librería y Ediciones. España. Tomo IV. 467-468.
 - Castañeda BR, GMS Lozano. 1998. Palynological análisis refer to finding of *Mammuthus columbi* in the upper Lerma basin, México. *American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting*. Puerto Vallarta Mexico. 95.
 - Cook, ER, y LA Kairiukstis. 1990. *Methods of Dendrochronology*. Luwer Academic Publisher. Netherlands. 394.
 - Crowley TJ. and GR North. 1991. *Paleoclimatology*. Oxford University Press. 349.
 - Diaz H F, G N Kiladis. 1992. Atmospheric teleconnections associated with the extreme phases of the Southern Oscillation. In Diaz HF and V Markgraf (eds) *El Niño: Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge. Cambridge University Press. 7-28.
 - Douglas, AV. 1980. Geophysical estimates of sea-surface temperatures off western North America since 1671. *CalCOFI Rep. Vol XXI*: 102-112.
 - Douglas AV, PJ Englehart. 1995. An analysis of the starting date for the summer monsoon in western Mexico and southeast Arizona. *Proceedings of the twentieth annual climate diagnostics workshop*. Seattle, Washington.
 - Dumbar RB. 1998. Coral records of ENSO and decadal ENSO-linke climate variability from the eastern pacific: a multi-site síntesis from Galápagos to Baja California. *American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting*. Puerto Vallarta México: 18-20.
 - Finley, R.B. 1990. Woodrat Ecology and behaviour and the interpretation of paleomiddens. In: Betancourt, J.L., T.R. VanDevender, and P.S. Martin (eds). *Packrat Middens The last 40,000 years of biotic Change*. The University of Aroznoa Press. Tucson.28-42
 - Florez ZE. 1998. Geosudcalifornia. Geografía, agua y ciclones. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México. 277.
 - Florescano E, S Swan. 1995. *Breve historia de la sequía en México*. Universidad Veracruzana. México. 246.pp
 - Fritts HC. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press . London U.K. 576 pp.

-
- García E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Copen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. 2ª Ed. Instituto de Geografía. UNAM. México. 252 pp
 - García E. 1978. *Apuntes de Climatología*. UNAM. México. 153
 - García AV, AO Escobar. 2000. Introducción. En: García AV (Coord.). *Estudios históricos sobre desastres naturales en México*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. México. 9-17
 - Gates DM. 1993. Climate Change and its biological consequences. Sinauer Associates Inc. USA. 280
 - Greene K. 1995. *Archaeology: an introduction*. University of Pennsylvania Press. 208 pp.
 - Grissino-Mayer HD. 1993. An update list of species used in tree-ring research . *Tree-Ring Bulletin*. 53:17-43.
 - Grissino-Mayer. 2001. The significance of dendrochronological research in the Earth Sciences.
 - Hastings JR, Turner RM. 1965. Seasonal precipitation regimes in Baja California, Mexico. *Geografiska Annaler*. **47A**: 204-223.
 - Hernández CG. 2000. *El alga gigante *Macrocystis pyrifera* (L.) C. Agardh en Baja California Sur, México: Ecología y su aprovechamiento para la producción de alginatos*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. CIBNOR.
 - Hidore JJ, Oliver JE. 1993. *Climatology. An atmospheric science*. Macmillan Publishing Company. New York, USA. 423 pp.
 - Hughen KA. 1998. Climatic linkages between high-latitude north Atlantic, tropical south America and ocean circulation: evidence from the Cariaco basin. *American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting*. Puerto Vallarta Mexico. 26-28.
 - Israde-Alcántara I, MS Lozano-García, R Vázquez-Durán, VH Garduño-Monroy. 1998. Paleoenvironments and lake level records of lake Cuitzeo since the last 35,000 yr BP. *American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting*. Puerto Vallarta Mexico. 117.
 - Juillet A, LD Labeyrie, H Schrader. 1981. Oxygen isotope composition of diatom silica and silicofla gellate assemblage changes in the Gulf of California: a 700 year upwelling study. In Thiede J, and E Svess. Part B: *Coastal upwelling: its sediment record. NATO special conference proceedings*. USA. Plenum Press.: 277-293
 - Keigwin LD. and G.A. Jones. 1990. Deglacial climatic oscillations in the Gulf of California. *Paleoceanography*. 5(6):1009-1023.
 - Liñan F. 2002. En nueve meses el norte no tendrá agua. <http://www.reforma.com/nacional/articulo/198648/default.htm>
-

- Loock WJG. 2001. Abrupt and sudden climatic transition and fluctuations: a review. *International Journal of Climatology*. 21:1153-1179.
- Mercado GMC. 2001. *Análisis del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) para la península de Baja California, México (1981-2000) y su relación con el ENSO*. Tesis de Maestría en Ciencias. CIBNOR. 43.
- Metcalfe SE, A. Bimpson, AJ Courtice, SL O'Hara, DM Taylor. 1997. Climate change at the monsoon/westerly in northern Mexico. *Journal of Paleolimnology* 17(2): 155-171.
- Miller WE. 1977. *Pleistocene terrestrial vertebrates from Southern Baja California*. Department of Geology, Brigham Young University, Provo UTA
- Miller AA. 1982. *Climatología*. Editorial Omega. Barcelona España. 379 pp.
- Molina-Cruz A. 1988. Late Quaternary oceanography of the mouth of the gulf of California; the polycystine connections. *Paleoceanography* 3(4): 447-459.
- Padilla G, S Pedrín, E. Díaz. 1988. Historia Geológica y Paleoecológica. En: Arriaga L, A Ortega (Eds.) *La Sierra de La Laguna de Baja California Sur*. Publicación No. 1. Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur.
- Pérez CLL. 2000. *Estudio paleoceanográfico y sedimentológico holocénico de la Bahía de La Paz, Golfo de California*. Tesis para obtener el grado de Dr. En Ciencias del Mar. UNAM. México.
- Pike J., AES Kemp. 1997. Early Holocene decadal-scale ocean variability recorded in Gulf of California laminated sediments. *Paleoceanography*. 12(2): 227-238.
- Pisias NG. 1978. Paleoceanography of the Santa Barbara Basin during the last 8000 years. *Quaternary Research*. 10: 366-384.
- Poyak VJ, JC Cokendolpher, RA Norton, Y Asmerom. 2001. Wetter and cooler late Holocene climate in the southwestern United States from mites preserved in stalagmites. *Geology*. 29(7): 643-646
- Sabin AL, NG Pisias. 1996. sea surface temperature changes in the Northeastern Pacific Ocean during the past 20,000 years and their relationship to climate change in Northwestern North America. *Quaternary Research* 46(1):
- Salinas-Zavala CA. 2000. Sobre la respuesta al cambio climático en el noroeste de México. *Ciencia* . 51(3): 11-18.

-
- Salinas-Zavala CA. 2001. El trigo en el norte de México y El Niño 1997-1998. . En: Escobar B, Bonilla M, Badán A, Caballero M, Winckell A (comps) *Los efectos del fenómeno El Niño en México 1997-1998*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México:105-111.
 - Salinas-Zavala CA, SC Díaz. (en preparación). Climate variability and agriculture-dependent society in Northwest Mexico (1860-1997)
 - Sankey ST, TR Van Devender, WH Clark. 2001. Late Holocene plants, Cataviña, Baja California . *The Southwestern Naturalist*. 46(1): 1-7
 - Schrader H., T. Baumgartner. 1983. The radiocarbonrecord in varved sediments of Carmen Basin, Gulf of California; a measure of upwelling intensity variations during the past several hundred years. In: DeMaster DJ, KK Turekian. *Paleoceanography*. 2(3):249-254.
 - Schmidt RH. 1988. The Mega-Chihuahuan Desert. In Powell AM, Hollander RR., Barlow JC, McGillivray WB Schmidly DJ. (eds) *Papers from the Third Symposium on resources of the Chihuahuan Desert Region*. United Statesand México. Chihuahuan Desert Research Institute. 105-115..
 - Schweingruber F.H. 1987. *Tree Rings*. Kluwer Academic Publishers. 276.
 - Sirkin L., BJ Szabo, G. Padilla, S. Pedrin, E. Diaz. 1990. Uranium-series ages of marine terraces, La Paz Peninsula, Baja California Sur, México. *Coral Reefs*. 9: 25-30.
 - Spaulding WG, LJ Graumlich. 1986. The last pluvial climatic episodesin the desert of Southwestern North America. *Nutre* 320:441-444.
 - Stahle, D. W., E. R. Cook, M. K. Cleaveland, D. M. Meko, H. D. Grission-Mayer, E. Watson, and B. Luckman. 2000. Tree-ring Data Document 16th Century Megadrought Over North America. EOS, Transactions, American Geophysical Union 81: 121-125.
 - Stokes M.A., y T.L. Smiley. 1996. *An introduction to the Tree-Ring Dating*. The University of Arizona Press. 73.
 - Trenberth KE. 1991. General characteristics of El Nino-Southern Oscillation, In *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies* edited by M.H. Glantz, R.W. Katz and N. Nicholls, Cambridge University Press, 535p.
 - UrbanJ, Gómez-Gallardo A. 2001. Efectos de El Niño (1997-1998) y La Niña (1998-1999) en las ballenas grises de la Laguna San Ignacio, B.C.S. . En: Escobar B, Bonilla M, Badán A, Caballero M, Winckell A (comps) *Los efectos del fenómeno El Niño en México 1997-1998*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México: 206-215
-

- Van Devender TR. 1990. Late Quaternary vegetation and climate of the Sonoran Desert, United States and México. In: Betancourt JL, TR Van Devender and PS Martín. *Packrat Middens. The last 40,000 years of biotic change*. The University of Arizona Press. Tucson 134-165.
- Van Devender, T.R., R.S. Felger, R.M. Turner. 1990. Holocene vegetation of the Hornaday Mountains of North Western Sonora, México. *Proceedings of the San Diego Society of Natural History*. No.2. 1-19
- Van Devender TR, GL Bradley. 1994. Late quaternary amphibians and reptiles from Maravillas Canyon Cave, Texas, with discusión of the biogeography and evolution of the Chihuahua desert herpetofauna in: Brown PR. And JW Wright (eds) *Herpetology of the North America Deserts Proceedings of a Symposium*. Southwestern Herpetology Society. Special Publication No. 5: 23-54
- Van Devender TR, TL Burges, JC Piper, RM Turner. 1994. Paleoclimatic implications of Holocene plant remains from the Sierra Bacha, Sonora, México. *Quaternary Research*. 41(9): 99-108
- Vega VA, G Espinoza, C. Gómez, C. Castro, A del Valle, R. Ayala. 2002. Influence of the environment variability on the reproductive dynamic of the rock spiny lobster *Panulirus interruptus* at central Baja California during 1989-2001, and its importance for fishery management. Abstracts of La Paz Workshop on Global Change Impacts on the Californias. Marzo, 2002.
- Villanueva-Diaz J. 1998. Tree-Ring chronologies and ENSO in northern Mexico. *American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting*. Puerto Vallarta Mexico. 64-65.
- Vincent LA, X. Zhang, WG Hogg. 1999. Maximum and minimum temperature trends in Canada for 1895-1995 and 1946-1995. Preprints 10th Symposium on Global Changes Studies. Dallas, Texas. American Meteorological Society. p:95-99