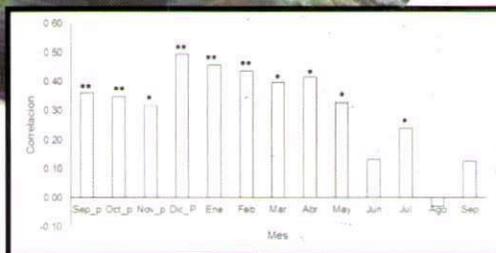
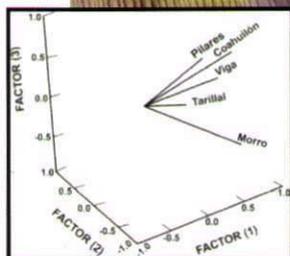
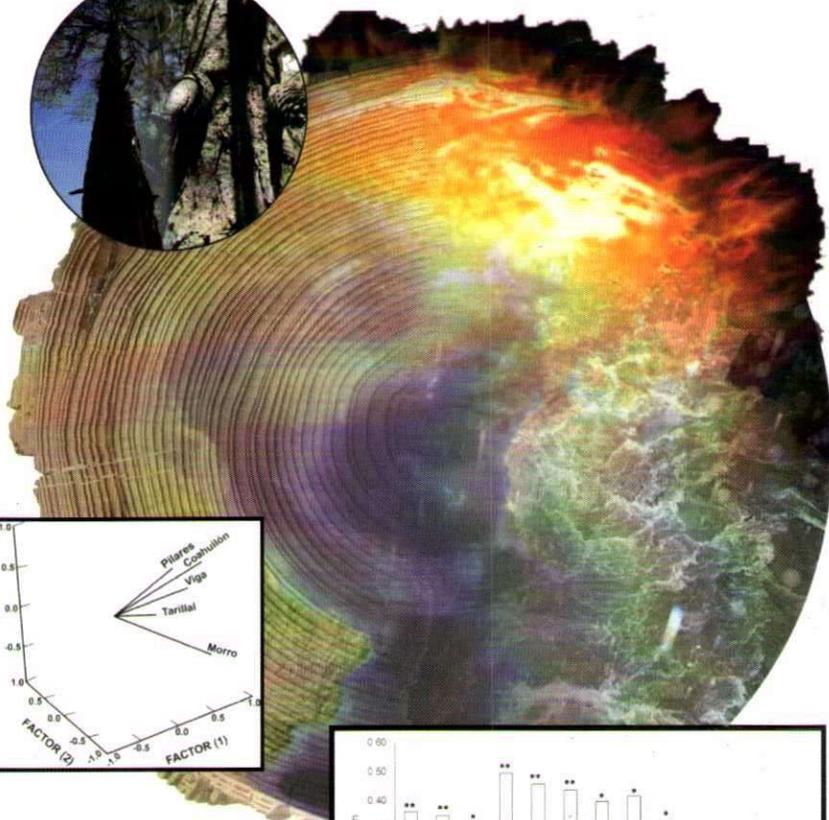


EXTRACCIÓN DE LA SEÑAL CLIMÁTICA EN ESPECIES ARBÓREAS DE IMPORTANCIA DENDROCRONOLÓGICA: FUNCIÓN DE RESPUESTA Y DE TRANSFERENCIA

JOSÉ VILLANUEVA DÍAZ, JULIÁN CERANO PAREDES, ALDO RAFAEL MARTÍNEZ SIFUENTES, LUIS UBALDO CASTRUITA ESPARZA, JUAN ESTRADA ÁVALOS



SADER

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL



inifap

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta -Atmósfera
Gómez Palacio, Durango, Junio 2019
Folleto Técnico Núm. 46 ISBN: 978-607-37-1113-5

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

Dr. Víctor Manuel Villalobos Arámbula
Secretario

Dr. Miguel García Winder
Subsecretario de Agricultura

Ing. Víctor Suárez Carrera
Subsecretario de Autosuficiencia Alimentaria

Lic. David Monreal Ávila
Coordinador General de Ganadería

Dr. Salvador Fernández Rivera
Coordinador General de Desarrollo Rural

Lic. Ignacio Ovalle Fernández
Titular del Organismo de Desarrollo Rural

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y
PECUARIAS**

Dr. José Fernando De La Torre Sánchez
Director General

Dr. José Antonio Cueto Wong
Encargado del Despacho de los Asuntos de la Coordinación de Investigación,
Innovación y Vinculación

M.C. Jorge Fajardo Guel
Coordinador de Planeación y Desarrollo

M.A. Eduardo Francisco Berterame Barquin
Coordinador de Administración y Sistemas

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN RELACIÓN AGUA-
SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA**

Dr. Juan Estrada Ávalos
Director del CENID

**Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y
Pecuarias**

**Progreso No. 5
Barrio de Santa Catarina
Delegación Coyoacán
C.P. 04010, México, D.F.
Teléfono (55) 3871 – 8700**

ISBN: 978-607-37-1113-5

Primera edición 2019

**No está permitida la reproducción total de esta publicación,
ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya
sea electrónico, mecánico, fotocopia u otros métodos, sin el
permiso previo y por escrito de la institución.**

**EXTRACCIÓN DE LA SEÑAL CLIMÁTICA EN ESPECIES
ARBÓREAS DE IMPORTANCIA
DENDROCRONOLÓGICA: FUNCIÓN DE RESPUESTA Y
DE TRANSFERENCIA**

**José Villanueva Díaz
Julián Cerano Paredes
Aldo Rafael Martínez Sifuentes
Luis Ubaldo Castruita Esparza
Juan Estrada Ávalos**

CONTENIDO

Resumen.....	1
Introducción.....	1
Importancia de la formación de anillos de crecimiento anual y su relación con variables ambientales.....	3
Procedimientos utilizados de extracción de la señal climática.....	5
Componentes principales.....	6
Programas estadísticos existentes para análisis de la función de respuesta.....	8
Aplicaciones de funciones de respuesta en estudios dendroclimáticos.....	9
Limitaciones en las bases de datos climáticas para el desarrollo de funciones de respuesta.....	10
Alternativa de obtención de información climatológica mediante el uso de modelos de datos asimilados y SIG.....	11
Desarrollo de la función de respuesta cuando se cuenta con registros sólo de precipitación.....	16
Desarrollo de la función de respuesta cuando se cuenta con registros de precipitación y de temperatura.....	21
Determinación de la función de respuesta mediante el programa Dendroclim2002: AC++.....	25
Interpretación de los resultados de función de respuesta climática.....	28
Función de transferencia.....	29
Consideraciones finales.....	30
Literatura citada.....	33
Agradecimientos.....	39

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1	Cronologías próximas a la cuenca del río Mayo en el estado de Sonora, empleadas para la respuesta a precipitación del modelo NLDAS-2.....	13
Cuadro 2	Datos de precipitación acumulada mensual de 1950 hasta 2015 comparadas con las series Std y Res.....	19

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Gráfico de sedimentación de análisis de componentes principales que muestra la varianza explicada de cada componente, el CP1 explica la mayor variabilidad.....	7
Figura 2	Ubicación geográfica de la cuenca del río Mayo y sobreposición de la precipitación extraída del modelo NLDAS-2 para la extracción de los datos alojados en el raster.....	13
Figura 3	Gráfico de carga del análisis de componentes principales generado en Minitab v17, muestra la respuesta común entre cronologías.....	14
Figura 4	Diagrama de dispersión generado en el software de uso libre R, la línea azul muestra la tendencia del modelo lineal con los datos de precipitación acumulada del periodo octubre-mayo y la cronología versión estándar de madera temprana del sitio COB. La zona sombreada señala la significancia al 95%.....	15
Figura 5	Distribución de una red dendrocronológica en la Unidad de Manejo Forestal 0807, en bosques mixtos de coníferas del suroeste de Chihuahua en la Sierra Madre Occidental.....	17
Figura 6	Componentes principales de una red de ocho series dendrocronológicas desarrolladas en la UMAFOR 0807 en la región Suroeste del estado de Chihuahua.....	18
Figura 7	Correlaciones Pearson entre los valores de precipitación acumulada mensual y la cronología regional, representativa de la UMAFOR 0807 en el suroeste de Chihuahua. Un asterisco (*) indica significancia al 95% ($p < 0.05$), dos (**) al 99% ($p < 0.01$) y los demás no son significativos ($p > 0.05$).....	20
Figura 8	Correlaciones Pearson entre los valores de precipitación acumulada mensual y la cronología regional, representativa de la UMAFOR 0807 en el suroeste de Chihuahua. Las líneas verticales indican el error estándar para cada valor de correlación.....	21
Figura 9	Localización geográfica de los sitios de estudio en Sierra de Arteaga, Coahuila, y la estación climática de donde se obtuvieron los datos meteorológicos para el desarrollo de los análisis dendroclimáticos.....	22
Figura 10	Análisis de componentes principales que indica una misma variabilidad de las cronologías Los Pilares, El Coahuilón, La Viga, El Tarillal, y El Morro. Todas las series se agrupan en el CP1 (Cerano <i>et al.</i> , 2011).....	23
Figura 11	Función de respuesta de la cronología regional de madera temprana considerando las variables de precipitación y temperatura (Cerano <i>et al.</i> , 2011).....	24
Figura 12	Gráfico de salida del programa de función de respuesta Dendroclim, que señala los valores de correlación entre la cronología estándar de la UMAFOR 0807 y los datos regionales de precipitación mensual del periodo estacional septiembre del año previo a septiembre del años actual de crecimiento.....	27
Figura 13	Valores de correlación de la función de respuesta con datos de precipitación mensual de la cronología regional para la UMAFOR 0807 y datos de precipitación mensual septiembre del año previo a septiembre del año actual de crecimiento. La precipitación de los meses del año con mayor influencia en el crecimiento son octubre y diciembre del año previo al inicio del crecimiento.....	27
Figura 14	Relación entre el ancho de anillos y la precipitación acumulada septiembre del año previo a mayo del año actual de crecimiento. La línea punteada es una línea de tendencia ajustada a las observaciones.....	31

EXTRACCIÓN DE LA SEÑAL CLIMÁTICA EN ESPECIES ARBÓREAS DE IMPORTANCIA DENDROCRONOLÓGICA: FUNCIÓN DE RESPUESTA Y DE TRANSFERENCIA

José Villanueva Díaz¹

Julián Cerano Paredes¹

Aldo Rafael Martínez Sifuentes²

Luis Ubaldo Castruita Esparza³

Juan Estrada Ávalos¹

Resumen

La extracción de la función de respuesta es uno de los procedimientos más importantes en estudios dendrocronológicos, en particular, de aquellos enfocados a la reconstrucción de variables climáticas. En este folleto técnico, se describen los procedimientos más comunes que han sido utilizados desde hace varias décadas para definir esta respuesta. La generación de programas específicos avocados a obtener la relación clima-crecimiento inició hace casi medio siglo y en décadas recientes, se han desarrollado programas más robustos que permiten no sólo analizar esta respuesta en el total de registros climáticos disponibles, sino que también dan la oportunidad de analizar de manera evolutiva como esta respuesta se mantiene o cambia a través del tiempo. En el presente documento, se proporcionan ejemplos de la función de respuesta con series de crecimiento de las especies más comunes en el norte y noreste de México.

Introducción

México es un país megadiverso con más de 8,000 especies arbóreas y arbustivas en su territorio (Villaseñor *et al.*, 2013), las cuales son de gran importancia ecológica, económica y social y su uso sustentable y conservación, constituye un reto para las instituciones que realizan investigación, de aquellas que legislan su aprovechamiento y de los propios usuarios del recurso.

Desde el punto de vista de investigación, resulta relevante determinar el efecto de variables climáticas y definir aquellas con mayor influencia en el crecimiento; en particular, para las especies arbóreas o arbustivas que muestran crecimientos anuales bien definidos, lo cual es importante para determinar incrementos

¹ Investigador INIFAP CENID-RASPA

² Asistente de investigación INIFAP CENID-RASPA

³ Catedrático-Investigador Universidad Autónoma de Chihuahua

anuales, tasas de volúmenes de captura de carbono, predicción de producción de biomasa y capacidad de crecimiento, efecto del calentamiento global en la estabilidad de las especies, reconstrucciones hidroclimáticas, entre otras diversas aplicaciones (Stahle *et al.*, 2000).

Una de las metodologías para determinar la influencia de las variables climáticas en la variabilidad del grosor de los anillos de crecimiento, se conoce como “*análisis de función de respuesta*”, cuyo uso fundamental es definir las variables climáticas que más aportan a la variabilidad en el grosor de los anillos de crecimiento anual (Fritts, 1976).

De manera idealizada, la influencia de variables climáticas podría ser determinada o verificada mediante un monitoreo detallado de los procesos fisiológicos que toman lugar en árboles maduros establecidos en condiciones naturales (Cropper, 1985). Este procedimiento, sin embargo, aunque puede ser utilizado para estudios fisiológicos de especies arbóreas, mediante la instalación de estaciones climáticas automatizadas, dendrómetros y sensores de humedad, entre otros dispositivos para medir gradientes de flujos, demandan tanto de una gran inversión como de tiempo y la información resultante, aunque detallada, es muy específica y de corta duración y es de utilidad sólo para las especies en estudio y para la localidad donde se realizan (Biondi y Hartsough, 2010). Una opción a lo anterior es el uso de datos climáticos, que al compararse antes y durante la estación de crecimiento, simulen el proceso biológico, no sólo durante el año en el cual se genera el crecimiento, procedimiento que favorece un incremento en la intercorrelación de las variables climáticas involucradas (variable independiente).

La determinación de la función de respuesta es un procedimiento que ha sido utilizado desde hace décadas y ha permitido generar un mejor entendimiento del impacto de variables ambientales en el crecimiento y comportamiento biológico de diversos géneros y especies. Este procedimiento, de manera tradicional, se ha circunscrito a definir la influencia que tiene la temperatura y precipitación acumulada mensual, de meses previos al crecimiento (año anterior) y durante el período que compone la estación de crecimiento (meses del año actual de crecimiento) de la especie arbórea en estudio. Sin embargo, la inclusión de un número mayor de variables climáticas es importante para

determinar una mejor respuesta del incremento anual de especies arbóreas y de su influencia a variables ambientales.

La definición de una función de respuesta y el desarrollo de un modelo de transferencia, permite transformar los índices de anillos de crecimiento en valores de precipitación, temperatura, volúmenes de flujo, índices de fenómenos atmosféricos de circulación general, índices de sequía, entre otros. Lo anterior, demanda que los modelos generados expliquen la mayor varianza posible de la variable a reconstruir, por lo que, la obtención de una función de respuesta de excelente calidad es importante para generar un modelo de transferencia que permita realizar reconstrucciones climáticas que se ajusten lo más cercano a las condiciones reales (Cook y Pederson, 2011)

El objetivo de este folleto es describir las técnicas más comunes utilizadas para definir la influencia de variables climáticas en el incremento anual de especies arbóreas; de tal forma que, constituya una referencia de consulta para estudiantes e investigadores que inician en estudios dendrocronológicos y que buscan determinar la influencia de variables climáticas en el incremento radial de especies arbóreas de interés maderable, alimenticio, industrial, ecológico o de cualquier otro tipo.

Importancia de la formación de anillos de crecimiento anual y su relación con variables ambientales

La formación de anillos anuales en secciones transversales de especies arbóreas, que muestran patrones similares de crecimiento, permite realizar con precisión su datado (Stokes y Smiley, 1968). Este crecimiento, sin embargo, tiene la influencia de varios factores entre los que se encuentran los genéticos y medioambientales; factores que interactúan durante la estación de crecimiento definiendo el grosor del incremento anual de la especie. Dentro de los factores ambientales, uno es el que debe limitar con mayor severidad el crecimiento y su intensidad debe fluctuar de un año a otro, de tal forma que, el grosor del crecimiento anual sea función de la intensidad con que se presente dicho factor limitante. De esta manera, al establecer un patrón de crecimiento bien definido es factible asignar fechas calendáricas a cada anillo de crecimiento, y establecer una

relación estadística que defina qué factores ambientales son los que determinan el incremento anual; esta relación es la que se denomina “función de respuesta” (Cropper, 1985).

Una de las limitaciones de las funciones de respuesta es que el crecimiento anual (variable dependiente) interactúa con otras variables climáticas (variables independientes); además de que, otras variables ambientales de carácter colateral desempeñan un papel importante en el crecimiento arbóreo. La técnica estadística de función de respuesta, genera coeficientes cuya magnitud y dirección (signo) indican el grado de asociación entre las variables ambientales y el valor de los índices de las series de crecimiento. La formulación de algoritmos para determinar la función de respuesta con miras a extraer la señal climática de series de crecimiento anual ha evolucionado a través del tiempo, y han sido descritas desde hace varias décadas por diferentes científicos involucrados en estudios dendroclimáticos (Fritts, 1976; Cook y Pederson, 2011). Se han generado modelos específicos para este fin, y los estudios para determinar las variables climáticas o ecológicas que afectan el grosor del anillo anual continúan en desarrollo hasta la actualidad; particularmente, porque cada día surgen nuevas mejoras tecnológicas en instrumentos para registros climáticos, nuevos procedimientos estadísticos, desarrollo de software y estudios de fisiología vegetal, aunado a ello, el interés creciente en determinar tasas de crecimiento de especies de importancia comercial, de las cuales se desconocía hasta hace poco la formación de anillos de crecimiento anual y la posibilidad para fechar su incremento radial; en particular, para especies de ecosistemas tropicales y semitropicales, que tradicionalmente se creía no producían anillos de crecimiento anual; pero que con el uso de nuevas técnicas de fechamiento, como es el caso de isótopos (Baker *et al.*, 2015), en muchas de ellas, se ha demostrado la formación de bandas de crecimiento anual provocadas por problema de inundación y abatimiento de oxígeno disuelto, entre otros factores limitantes (Schweingruber, 1996; Roig *et al.*, 2012; Brien *et al.*, 2009).

Procedimientos utilizados de extracción de la señal climática

Cropper (1985) en su tesis doctoral, desarrollada hace más de 30 años, realizó un análisis exhaustivo de las metodologías estadísticas utilizadas hasta ese momento para extraer información climática de incrementos anuales en series de crecimiento. Aunque nuevas herramientas tecnológicas se han desarrollado desde esa época hasta la fecha, el fundamento científico descrito en su trabajo de investigación es aún válido; no obstante que, nuevos modelos y mejores capacidades computacionales permiten obtener esa función de respuesta con mayor agilidad y veracidad. Los métodos descritos son los siguientes:

Correlación simple: este es uno de los métodos más usados para determinar la influencia de variables climáticas sobre el incremento anual; sin embargo, uno de los problemas inherentes de este método es que las variables del clima, generalmente se encuentran altamente correlacionadas con otras variables, así como con los anillos de crecimiento, lo que puede enmascarar su asociación con los incrementos anuales. Las posibles consecuencias de este problema, incluye la presencia de altas varianzas y covarianzas de los estimadores del mínimo cuadrado de los coeficientes de regresión, por lo que se dice que existen problemas de múltiple colinearidad, lo que implica que repeticiones diferentes del mismo análisis pudieran producir resultados contrastantes, así como que los valores estimados tiendan a ser más grandes en valor absoluto a los valores reales (Montgomery y Peck, 1982).

Regresión Lineal Múltiple: este procedimiento se propuso como alternativa para minimizar las intercorrelaciones observadas entre diversas variables climáticas; metodología que fue complementada por Fritts (1962) al proponer un procedimiento adicional para reducir el número de variables analizadas.

Regresión con Componentes Principales: Esta metodología fue desarrollada por Fritts (1976), en la forma de función de respuesta en anillos de árboles, donde señala que, este procedimiento a comparación de la correlación múltiple, produce estimaciones más

estables a nivel mensual de los coeficientes de regresión de variables climáticas; sin embargo, también está sujeta a la obtención de coeficientes con grandes errores estándar estimados.

Componentes principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) tiene como objetivo transformar un conjunto de variables, denominadas originales, en un nuevo conjunto de variables o componentes principales. Estas últimas, se caracterizan por estar intercorrelacionadas entre sí y pueden ordenarse de acuerdo con la información que tienen incorporada. Como medición de la cantidad de información incorporada en un componente, se utiliza su varianza; es decir, cuanto mayor sea su varianza, mayor será la cantidad de información que contiene dicho componente (Hair, J.F. *et al.*, 1999).

Al correr este tipo de análisis, algunos programas tienen la opción de seleccionar el número de componentes de salida, aunque generalmente se tienen por default, representando el primer componente (CP1) la mayor varianza, y el último la menor varianza (Jolliffe, 1986). En estudios dendroclimáticos, los análisis de componentes principales pueden derivarse de una base de datos climática o de una red de series dendrocronológicas; un ejemplo para el último caso, en un estudio desarrollado en el municipio de Bocoyna, Chihuahua, donde se generaron tres cronologías con base en los crecimientos anuales de *Pinus arizonica* procedentes de tres diferentes sitios. El objetivo del estudio fue analizar si las series registraban una misma variabilidad y definir la factibilidad de integrar una cronología regional o trabajar las series de manera individual; para este efecto, se corrió un ACP; el análisis indica que las series presentan una misma variabilidad y que se pueden integrar en una misma serie de crecimiento, esto es, las tres cronologías se cargaron en el CP1, representando 80.03% de la varianza total (Figura 1).

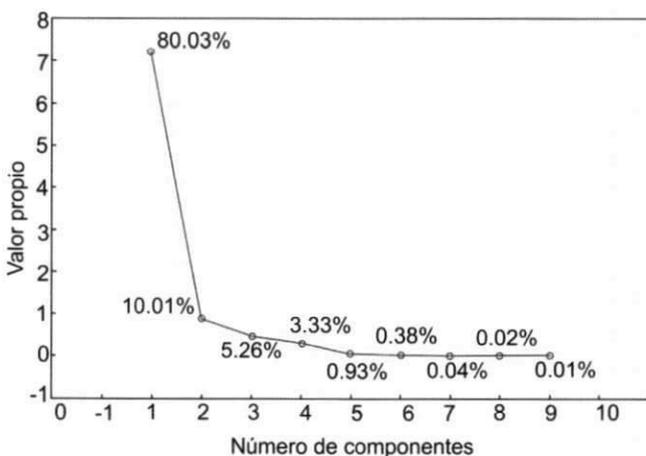


Figura 1. Gráfico de sedimentación de análisis de componentes principales que muestra la varianza explicada de cada componente, el CP1 explica la mayor variabilidad (80.03%).

Un ejemplo proporcionado por Fritts (1976), se relaciona con datos climáticos de Mesa Verde, ubicado en el suroeste del estado de Colorado, para el período 1923-1962 (39 años) con datos de temperatura media mensual y de precipitación acumulada mensual. En este caso, se quiere determinar la influencia de 14 meses de precipitación y de 14 meses de temperatura, distribuidos previo (junio-diciembre) y durante la estación de crecimiento (enero-julio). La forma de ordenar los datos sería construir una matriz compuesta por 39 columnas (años) y 28 hileras (14 datos mensuales de temperatura y 14 datos de precipitación). El primer paso para obtener los componentes principales es calcular los coeficientes de correlación simple para cada variable, en comparación a las otras variables. La matriz de componentes principales (eigenvalues) se obtienen de la matriz de correlación, al transformar un número de variables correlacionadas en una nueva matriz de variables no correlacionadas, donde se ha reducido entre 90 a 95% de la varianza contenida en los datos originales. Para un análisis detallado del proceso de cálculo completo de los componentes principales, el lector puede consultar la cita original (Fritts, 1976) o

bien checar otras referencias, que detallan paso a paso el cálculo de componentes principales (Smith, 2002).

Programas estadísticos existentes para análisis de la función de respuesta

A través de los años se ha desarrollado una serie de programas enfocados a determinar la función de respuesta climática de especies arbóreas, los cuales se fundamentan en analizar las correlaciones entre crecimiento y variables climáticas mensuales; uno de estos programas es el desarrollado por H.C. Fritts, denominado PRECON5.1, cuya última actualización denominada PRECON6, se publicó en 2009, pero que se discontinuó debido a problemas en su funcionamiento. El software es gratuito y se puede descargar de la página web del Laboratorio de Anillos de Árboles de la Universidad de Arizona (<https://www.ltrr.arizona.edu/webhome/hal/dlprecon.html>).

Otro de los programas disponibles para análisis de función de respuesta es la rutina RES RESPO (función de respuesta y de correlación con el clima) desarrollado por Janice M. Lough del Instituto Australiano de Ciencias Marinas y modificado por Holmes (1994), el cual se encuentra integrado en la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés) (<https://www.ltrr.arizona.edu/software.html>). Este programa determina la función de respuesta entre una serie de crecimiento de anillos de árboles y datos climáticos, mediante análisis de componentes principales. El programa calcula la función de correlación aunado a la función de respuesta. Para cargar los datos al programa, se ingresa la cronología en cualquiera de sus versiones (estándar, residual o arstan); luego los datos climáticos a nivel mensual, por ejemplo, temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima, etc., posteriormente se ingresan datos de precipitación mensual acumulada y se define el período de meses de análisis; por ejemplo, septiembre del año previo a diciembre del año actual de crecimiento; en cuyo caso, cuando el programa pregunte por el primer año de análisis, este va a ser un año posterior al primer año con información climática disponible; es decir, si los datos

climáticos se extienden de 1950 a 2017, el primer año de análisis será 1951 y el último 2017.

Actualmente uno de los programas estadísticos más usados para este propósito es DENDROCLIM2002: AC++, desarrollado por Biondi y Waikul (2004), el cual utiliza intervalos de confianza "*bootstrapped*" para estimar la significancia tanto de la correlación como de la función de respuesta. El programa tiene la habilidad de analizar cambios temporales presentes en la relación entre la serie dendrocronológica y los datos climáticos, lo que permite obtener una representación dinámica a través del tiempo de la relación estadística entre clima y crecimiento. El programa puede contrastar con la serie de crecimiento hasta tres variables climáticas y utiliza un mínimo de 50 años de registro. Tiene un tutorial para su mejor ejecución y es muy amigable para realizar los análisis y hacer la interpretación de la información generada.

Aplicaciones de funciones de respuesta en estudios dendroclimáticos

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) alberga en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) al Laboratorio Nacional de Dendrocronología, donde se ha generado una red dendrocronológica nacional, que comprende más de 300 series de crecimiento, con las cuales se ha realizado diversas reconstrucciones de variables climáticas e hidrológicas; así como determinado la influencia de fenómenos atmosféricos de circulación general. En este proceso, se han definido funciones de respuesta para determinar los meses o períodos en los cuales se ha encontrado una asociación favorable y significativa entre los datos climáticos (precipitación mensual, estacional o anual, temperatura mensual o promedio estacional), índices del Niño Oscilación del Sur, Oscilación Decadal del Pacífico, Oscilación Multidecadal del Atlántico, índice de Sequía de Severidad de Palmer reconstruido e índice estandarizado de Precipitación Evaporación y el anillo de crecimiento anual, con las cuales se han establecido modelos de transferencia para reconstrucciones dendroclimáticas en la longitud total de las cronologías, o en el

período en el que existe un tamaño de muestra adecuado para que la reconstrucción sea estadísticamente confiable, conocido como Señal Expresada de la Población (EPS) (Wigley *et al.*, 1984).

Las reconstrucciones de lluvia estacional en México se han extendido hasta varios siglos en el pasado y permitido determinar la magnitud e historicidad de sequías a través del Índice Reconstruido de Sequía de Severidad de Palmer, sequías que han impactado en la mayor parte del territorio mexicano (Stahle *et al.*, 2016); información que puede ser extraída del Atlas de Sequía para México (<http://drought.memphis.edu/MXDA/>).

Limitaciones en las bases de datos climáticas para el desarrollo de funciones de respuesta

La generación de funciones de respuesta requiere de registros climáticos sólidos, extensos, representativos y confiables. Esta condición difícilmente se cumple con las series de registros climáticos disponibles para México, las cuales generalmente se obtienen de redes climáticas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) y que han sido compiladas en un Extractor Rápido de Información Climática por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (ERIC III, 2013). Aunque en los últimos años, diversas instituciones, entre ellas el INIFAP han establecido redes de estaciones climatológicas automatizadas en gran parte del territorio nacional, una limitante es que los registros aún son incipientes e inferiores a 20 años de información. Otro de los inconvenientes es que la ubicación geográfica de las estaciones se encuentra en las partes bajas de las cuencas, donde son de utilidad principalmente con fines agrícolas. La existencia de estaciones climáticas en sitios montañosos donde se encuentra la mayoría de las especies utilizadas con fines dendrocronológicos, es muy limitada, debido a este problema, en muchos de los estudios realizados se han estimado datos perdidos de estaciones individuales más cercanas a los sitios de estudio y luego combinadas en estaciones representativas de un sitio o de una región particular.

Por otro lado, se han realizado diversos esfuerzos para integrar las series climáticas en “*grids*” o mallas regionales, una de estas iniciativas es la desarrollada por (Terán, 2010); en la cual estimó

datos perdidos de estaciones climáticas y las integró en un *grid* regional, las cuales cubren el período 1950-2015; estos *grid* sólo disponen de precipitación acumulada mensual, lo cual es una limitante para un análisis completo de función de respuesta, ya que su análisis normalmente involucra registros de temperatura y de precipitación. No obstante, esta información es de suma valía científica, ya que la precipitación es el principal factor limitante del crecimiento anual de especies arbóreas en el norte y centro de México; por lo que es importante definir la relación existente entre la precipitación estacional o anual sobre el crecimiento del anillo total o de series de crecimiento de madera temprana y tardía.

Adicionalmente, existe información climática de la NASA en su servidor "*The Bridge Between Data and Science v 4.28*", donde se pueden descargar mapas o series de tiempo de datos de precipitación, temperatura, evaporación, CO₂ entre otras variables atmosféricas, que pueden auxiliar en el análisis de regiones donde se tiene información de baja calidad en las estaciones meteorológicas; si bien, algunas series de datos son cortas, en ocasiones se puede llegar a generar una ecuación estadísticamente confiable que permita la reconstrucción de la variable bajo estudio (NASA. 2018).

Otra fuente de información climática es el sitio *WorldClim*, que consiste en un conjunto de capas del clima global de promedios comprendidos desde 1970 hasta 2000 con resolución espacial de píxel de un kilómetro cuadrado (<http://www.worldclim.org/>).

Alternativa de obtención de información climatológica mediante el uso de modelos de datos asimilados y SIG

El modelo NLDAS-2 (North American Land Data Assimilation System v002) (David, NASA/GSFC/HSL. 2012) brinda información de precipitación, al igual que de otras variables incidentes en la superficie terrestre como de humedad y temperatura superficial, flujos de radiación, calor latente y sensible mediante la integración de datos observados y modelado de la superficie terrestre (Mocko, 2012). El modelo NLDAS-2 comprende datos horarios y acumulados mensuales desde 1979 a 2018; este trabajo fue generado en conjunto por un grupo nutrido de instituciones internacionales, entre las más relevantes se menciona al National

Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el National Center for Environmental Prediction (NCEP), el Environmental Modeling Center (EMC), la National Aeronautics and Space Administration's (NASA) (Xia *et al.*, 2012).

La información se descarga en formato GRIB, el cual es un formato binario, que involucra datos meteorológicos. Estos datos proceden de NOAA y derivan de un modelo denominado de Predicción Meteorológica Numérica, generado por el Sistema de Pronóstico Global. La ventaja de emplear este tipo de formato, radica en su pequeño tamaño, por lo cual, lo hace idóneo en su manipulación.

Su resolución temporal es a nivel hora y mensual, con unidades de kg/m^2 y mm/mes , la resolución espacial es de 0.125° , aunque la cobertura espacial es limitada, tiene la ventaja de que aún cubre el norte de México (-125.0, 25.0,-67.0, 53.0).

Para ilustrar el uso de la metodología NLDAS-2, se realizó una reconstrucción de precipitación para la cuenca del río Mayo, Sonora; para lo cual, se extrajeron los datos mensuales disponibles en formato GRIB (raster) descargados mes con mes y se procesaron en ArcGIS v10.3; se concatenó la información de precipitación con la capa de la cuenca en estudio y convirtieron los píxeles con resolución de 0.125° a punto (vector), con el fin de generar un grid y poder extraer la información de precipitación (mm/mes) de 1979 a 2017 y trabajar los datos en una hoja de cálculo (Figura 2).

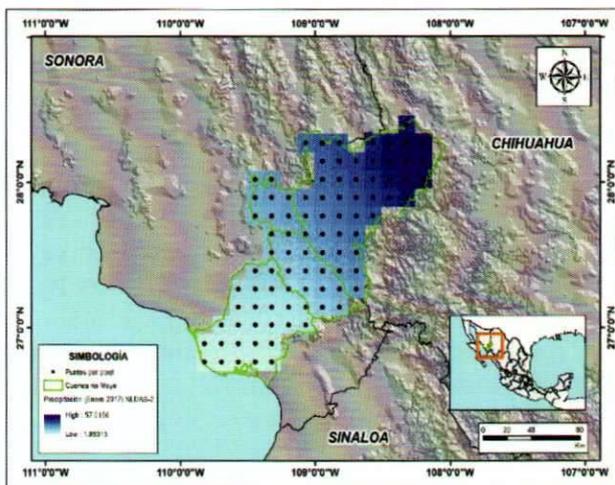


Figura 2. Ubicación geográfica de la cuenca del río Mayo y sobreposición de la precipitación extraída del modelo NLDAS-2 para la extracción de los datos alojados en el raster.

Los puntos del *grid* ya contienen la información extraída del modelo, por lo cual, se exportó como .dbf y trabajó en una hoja de cálculo de Excel. Las cronologías más próximas a la cuenca se encuentran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Cronologías próximas a la cuenca del río Mayo en el estado de Sonora, empleadas para la respuesta a precipitación del modelo NLDAS-2.

Cronología	Clave	Especie	Estado	Extensión (años)
Cebadillas de Ocampo	CDO	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Chihuahua	1588-2002
Barrancas del Cobre	COB	<i>Pinus arizonica</i>	Chihuahua	1745-2014

Tutuaca	TUT	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Chihuahua	1534-2012
Bisaloachi	BIS	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Chihuahua	1537-2002

Las series de madera temprana, tardía y de anillo total, se trabajaron mediante análisis de componentes principales (ACP) con el software Minitab 17 de Microsoft, acotando el periodo 1745-2002 puesto que es el periodo coincidente entre cronologías. El gráfico de carga muestra varianza común entre las cronologías CDO, BIS y TUT, pero un comportamiento diferente para la cronología COB (Figura 3). No se encontró asociación significativa entre los datos de precipitación acumulada y los valores derivados de integrar las tres cronologías (CDO, BIS, TUT), pero sí con la cronología de madera temprana versión estándar del sitio COB ($r=0.70$, $p<0.05$), periodo de precipitación acumulada octubre del año previo a mayo del año actual de crecimiento.

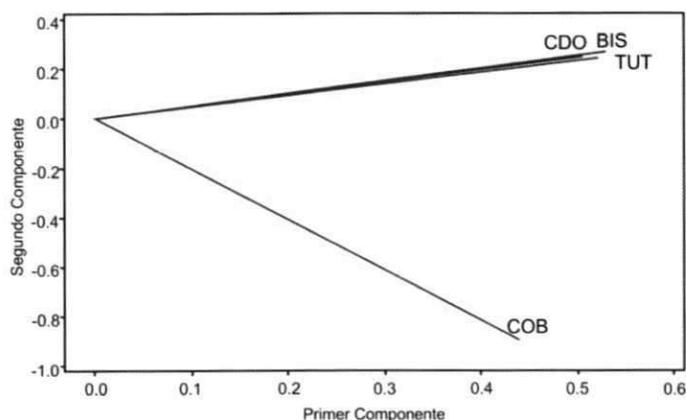


Figura 3. Gráfico de carga del análisis de componentes principales, el cual muestra la respuesta común entre cronologías.

El modelo de regresión ($r^2 = 0.50$) se generó con el software R versión 3.4.3 con la librería ggplot2 (Wickham, 2016) (Figura 4).

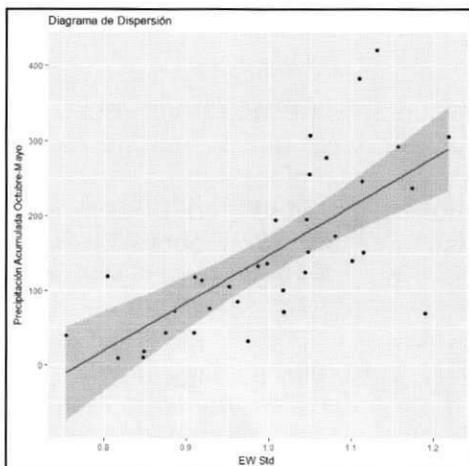


Figura 4. Diagrama de dispersión generado en el software de uso libre R, la línea azul muestra la tendencia del modelo lineal con los datos de precipitación acumulada del periodo octubre-mayo y la cronología versión estándar de madera temprana del sitio COB. La zona sombreada señala la significancia al 95%.

La verificación del modelo generado para reconstruir el período 1745-2014, se realizó con la subrutina *Verify* del DPL en el subperíodo 1966-1980 para calibración, y de 1997-2014 para validación. Es de notar, que la cronología que tuvo mayor respuesta, se ubica en el área de contribución de la cascada de Basaseachi en el estado de Chihuahua y no en el estado de Sonora, pero debe señalarse que las condiciones climáticas donde se generó la serie COB, inciden en el escurrimiento captado en el río Mayo. Con este estudio, se valida el uso de datos en formato *raster* para la generación de reconstrucciones en el territorio mexicano, siempre y cuando su localización abarque la zona de cobertura de este modelo; existen además otros modelos, entre los que se puede señalar al NCEP NARR (North American Regional Reanalysis) del NOAA, cuyos datos asimilados alojan una gran cantidad de variables a diferente capa de presión para todo Norteamérica, modelo con gran potencialidad para estudios climáticos, pero compromete su precisión al contar con una resolución espacial de 32 km.

Desarrollo de la función de respuesta cuando se cuenta con registros sólo de precipitación

El procedimiento que se ha usado para determinar la función de respuesta para una variable única, en este caso la precipitación es utilizar correlaciones simples, aun sabiendo que puede existir problemas de multicolinealidad con otras variables climáticas, pero que aun así, la información obtenida es de utilidad para analizar los meses o períodos estacionales en los cuales las series de tiempo de anillo total, madera temprana y madera tardía, responden de manera significativa a la lluvia acumulada mensual o estacional previa o durante la estación de crecimiento de las especies.

Un estudio de caso es el que considera el desarrollo de una cronología regional para la Unidad de Manejo Forestal 0807 (UMAFOR 0807) que integra los municipios de Guachochi, Balleza, Guadalupe y Calvo, Batopilas, Urique, Nonoava y Rosario en la región suroeste de Chihuahua (Figura 5).

En principio, se generó una red de cronologías de anillo total, madera temprana y tardía con diversas especies de coníferas distribuidas en toda el área de estudio. Las series dendrocronológicas de anillo total, se integraron mediante ACP para determinar el componente o componentes con mayor varianza común; en este caso, resultó ser el CP1 que captó una varianza común del 51.8%. (Figura 6). Las cronologías cargadas en el CP1 se utilizaron para generar una cronología regional representativa de la variabilidad climática de la zona de estudio.

Posteriormente, de la base de datos climática (Terán, 2010), se descargaron los registros de precipitación de los *grid* disponibles más cercanos para cada una de las cronologías consideradas en el CP1 y se promediaron para generar una serie de datos de precipitación, representativos de la región de estudio. Los registros acumulados de lluvia mensual cubrieron el período 1950-2015 (66 años).

Los registros de precipitación mensual se vaciaron en Excel, donde una columna fue para el año y el resto para los datos mensuales de lluvia acumulada. Se agregaron dos columnas más conteniendo las series dendrocronológicas de anillo total en su versión estándar y residual; de igual manera, pudiera

considerarse las series de madera temprana o de madera tardía. Debido a que el desarrollo del anillo anual de las especies de coníferas en el norte de México, tiene influencia de las condiciones climáticas del año previo, se consideró la precipitación de septiembre a diciembre del año previo y de enero a septiembre del año actual de crecimiento. De esta manera, el primer año analizado fue el crecimiento de 1951, pero con datos de precipitación de septiembre a diciembre del año previo (1950), por lo que se anexaron 13 columnas después de la correspondiente al año, cuatro (septiembre-diciembre del año previo) y nueve (enero-septiembre del año actual de crecimiento) (Cuadro 2).

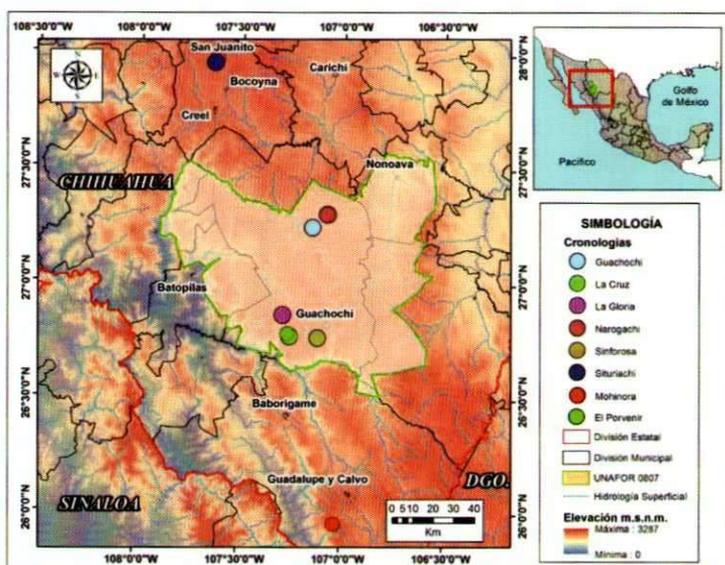


Figura 5. Distribución de una red dendrocronológica en la Unidad de Manejo Forestal 0807, en bosques mixtos de coníferas del suroeste de Chihuahua en la Sierra Madre Occidental.

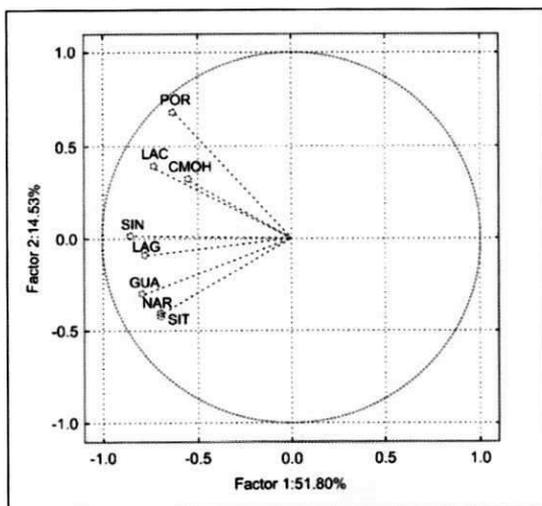


Figura 6. Componentes principales de una red de ocho series dendrocronológicas desarrolladas en la UMAFOR 0807 en la región suroeste del estado de Chihuahua.

Cuadro 2. Datos de precipitación acumulada mensual de mayo de 1950 hasta 2015 comparadas con las series Std y Res; la columna sombreada amarilla corresponde a los datos acumulados de precipitación periodo septiembre del año anterior a mayo del año siguiente; la columna naranja son los índices de ancho de anillo versión estándar y residual; las filas azules son las correlaciones resultantes del mes y los índices ($p < 0.05$); la columna verde son las correlaciones significativas del periodo septiembre-mayo.

Año	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agosto	Sep	Sep-May	Std	Res	
1951	14.45	23.76	0.00	0.14	20.38	9.40	8.98	0.89	6.61	41.91	120.02	122.28	40.41	148.80	0.8114	0.8183	
1952	40.41	49.20	0.50	40.88	0.65	0.38	0.88	0.30	5.12	98.38	138.07	122.28	29.73	163.29	0.8302	0.8347	
1953	20.72	1.82	48.88	42.58	0.00	14.78	0.46	7.02	5.24	25.78	214.40	130.06	32.43	137.89	0.8082	0.8084	
1954	32.43	20.12	4.58	14.38	38.41	0.04	1.00	0.11	0.18	67.82	138.88	224.94	62.28	120.46	0.8682	0.8124	
1955	62.28	77.20	0.05	0.15	100.92	3.58	4.84	0.00	0.02	22.87	168.00	184.98	84.30	203.20	0.7977	0.8038	
1956	84.30	96.39	17.84	1.41	22.34	3.28	0.00	0.27	18.53	79.03	118.81	79.23	60.83	201.00	0.7949	0.8084	
1957	101.93	8.92	2.33	18.85	31.03	0.36	20.88	0.33	0.94	22.78	94.88	229.24	54.54	154.00	0.8738	0.7707	
1958	164.54	22.80	1.24	22.26	28.23	38.82	28.48	2.91	0.38	162.38	184.98	208.00	208.03	209.47	0.7093	0.8048	
1959	208.03	104.28	35.48	14.38	2.69	21.78	0.52	20.61	9.82	54.07	143.38	203.82	28.18	424.04	0.8482	1.0007	
1960	38.18	35.03	18.70	78.18	157.48	2.09	0.00	0.00	6.00	8.88	254.92	178.00	31.84	364.85	0.847	1.0001	
1961	21.84	12.53	19.88	47.88	82.80	1.90	0.19	11.94	7.90	153.74	158.43	51.91	128.99	228.41	0.8641	0.8602	
1962	136.99	31.90	21.15	13.78	34.00	4.72	15.12	2.27	11.30	33.80	199.24	51.91	128.99	310.80	0.8181	0.8183	
1963	128.47	71.88	10.71	27.86	24.88	21.92	2.00	0.07	7.47	38.58	188.80	252.82	25.51	294.28	0.8388	0.8683	
1964	78.51	54.05	31.18	77.26	8.52	1.73	23.42	0.80	16.33	70.84	200.88	173.21	113.07	288.83	0.8428	1.0001	
1965	113.07	5.73	5.48	48.17	22.24	32.27	31.50	5.89	3.47	94.78	182.18	117.54	100.85	268.82	0.8112	0.8072	
1966	104.88	1.81	10.18	102.21	23.38	47.82	1.11	0.21	15.77	140.82	188.18	283.88	98.92	319.14	0.804	1.002	
1967	89.92	18.99	0.18	4.10	10.58	17.32	1.46	5.43	23.07	127.08	189.78	205.07	84.33	178.28	0.8883	0.8894	
1968	184.13	27.13	16.58	88.27	16.87	88.88	28.48	48.27	13.28	49.33	159.13	262.84	202.83	422.83	0.823	0.8484	
1969	164.44	22.89	87.06	15.02	8.84	37.80	1.11	0.02	4.70	8.84	229.98	78.48	20.88	215.82	0.8199	0.8192	
1970	20.88	23.65	5.89	53.56	11.65	20.48	28.91	0.68	4.05	42.20	177.78	180.03	197.87	178.05	0.8832	0.8832	
1971	187.87	0.08	0.00	24.77	4.01	4.04	0.00	3.14	1.88	70.10	187.89	128.18	48.48	238.48	0.8115	0.8137	
1972	48.48	112.53	2.87	29.18	28.07	0.04	10.36	0.00	4.78	58.38	128.88	147.40	128.13	134.18	0.8031	0.814	
1973	128.13	86.80	89.23	21.87	43.87	83.83	12.71	4.78	10.13	41.02	188.92	174.88	77.28	489.74	0.8888	1.0007	
1974	77.28	14.80	0.47	2.44	27.33	6.50	37.80	0.00	25.88	1.44	208.80	197.18	162.88	182.88	0.8428	0.8483	
1975	162.88	83.87	66.87	31.80	21.71	11.88	8.87	17.12	3.20	45.88	180.07	124.08	118.83	368.83	0.8689	1.0001	
1976	118.83	74.00	14.29	15.53	18.70	10.30	0.18	11.41	8.33	107.41	89.81	147.88	188.83	302.82	0.8089	0.8421	
1977	147.88	87.82	45.21	7.87	31.48	0.25	17.81	1.16	7.72	107.28	240.88	143.12	48.48	308.48	0.8883	1.0002	
1978	48.48	88.83	4.93	4.11	11.36	42.88	15.70	10.07	8.48	48.28	120.81	180.33	187.87	311.32	0.7147	0.7123	
1979	187.87	86.32	15.32	98.88	106.87	81.84	28.70	10.50	43.32	88.13	238.81	141.37	83.32	688.21	0.8221	0.8211	
1980	83.32	0.00	2.22	24.48	3.23	11.83	25.53	1.38	0.98	30.08	105.83	158.32	241.38	188.84	0.8812	0.8713	
1981	241.38	43.51	23.86	84.78	88.86	33.21	51.87	56.48	11.41	108.75	186.42	168.43	184.23	618.54	0.8214	0.8247	
1982	184.23	94.34	0.26	21.74	38.84	2.50	2.00	8.70	7.00	13.18	187.12	118.88	85.12	322.88	0.8883	1.0002	
1983	185.12	4.23	88.58	37.31	81.42	21.54	128.48	25.82	18.88	29.20	120.43	103.18	121.84	1248.88	0.8883	1.0008	
1984	103.18	79.24	80.96	25.84	38.70	2.47	1.17	4.21	34.29	222.47	137.48	208.78	101.88	887.88	0.8118	1.1118	
1985	151.40	84.80	28.88	106.83	115.71	23.41	36.64	40.88	8.40	110.18	145.18	112.78	159.82	104.72	0.8385	0.8287	
1986	159.82	49.74	35.72	8.84	7.14	18.31	2.48	32.43	25.14	164.82	238.44	188.80	75.35	300.07	0.8883	0.8884	
1987	75.35	85.38	8.87	70.49	15.86	14.70	3.38	10.71	29.10	48.98	198.08	188.11	54.12	288.44	0.8231	0.8488	
1988	54.12	2.80	8.11	48.48	4.88	4.88	2.88	0.54	8.22	104.87	231.20	207.22	28.58	148.98	0.8813	0.8812	
1989	38.58	1.87	0.00	31.78	74.73	89.33	18.28	3.58	3.73	29.77	128.89	204.84	115.37	238.84	0.8689	0.8687	
1990	115.37	21.48	22.14	94.75	19.03	30.68	27.82	3.07	3.11	81.80	228.93	117.88	103.81	337.84	0.8148	1.0010	
1991	103.81	85.11	48.81	134.28	58.81	89.82	8.85	0.28	0.07	18.48	418.87	229.72	158.88	488.88	0.8883	1.0002	
1992	158.88	94.47	37.78	108.89	108.37	61.72	83.88	13.27	22.83	80.82	193.32	189.04	54.84	878.88	0.8188	0.8188	
1993	54.84	32.20	11.84	88.28	57.35	1.86	7.58	21.88	87.84	178.43	177.38	188.24	377.88	1078.88	0.8883	1.0008	
1994	188.24	81.84	81.34	22.28	3.33	0.91	1.88	2.75	1.11	111.77	187.87	127.10	88.18	191.48	0.8689	0.8687	
1995	88.18	29.78	67.33	18.19	13.06	82.29	8.13	0.88	0.01	84.40	123.88	95.03	88.87	387.07	0.8188	1.0010	
1996	167.87	10.37	16.88	27.44	3.78	8.81	0.02	2.38	0.54	86.38	181.01	240.41	102.48	188.87	0.8811	0.8888	
1997	102.48	8.02	52.78	0.25	12.12	10.37	12.18	88.42	30.28	82.08	188.88	228.98	100.18	348.91	0.8174	0.8181	
1998	100.18	12.47	52.18	84.88	0.28	38.44	0.10	0.11	0.12	30.88	197.24	138.89	84.12	324.72	0.8883	0.8884	
1999	84.12	40.84	22.30	1.47	0.00	0.02	3.18	3.98	1.82	88.38	188.73	148.87	78.83	125.27	0.8788	0.8881	
2000	78.83	9.88	1.53	0.88	0.88	0.00	4.73	0.11	10.10	138.86	100.24	96.88	84.12	182.80	0.8488	0.8653	
2001	84.12	113.83	88.17	1.05	28.15	38.88	9.84	3.48	10.89	74.78	195.15	105.86	62.80	342.80	0.8788	1.1314	
2002	62.80	10.98	4.13	7.81	11.22	30.88	0.23	0.58	2.07	25.53	188.28	154.27	112.04	138.84	0.8171	0.8131	
2003	112.04	10.47	52.18	94.88	0.28	38.44	0.10	0.11	0.12	30.88	197.24	138.89	84.12	324.72	0.8883	0.8884	
2004	84.12	81.70	5.84	0.37	48.84	8.13	88.81	24.83	17.20	33.88	88.98	108.77	189.77	287.84	0.8188	0.8188	
2005	189.77	52.21	48.47	5.84	28.14	12.40	24.40	0.14	7.54	2.87	108.08	130.11	48.72	308.04	0.8074	0.8477	
2006	48.70	41.85	2.88	0.00	2.19	0.00	0.48	0.11	6.12	138.21	187.81	218.83	187.17	108.80	0.7887	0.8888	
2007	187.17	40.51	0.98	32.05	87.00	13.05	2.30	0.24	0.30	36.41	101.24	173.28	98.87	382.81	0.8148	0.8148	
2008	98.87	48.84	10.88	75.34	21.80	0.05	2.10	0.18	13.88	47.44	228.89	291.18	148.80	271.12	0.8874	0.8884	
2009	148.80	41.71	2.80	0.17	12.72	0.03	19.70	0.00	36.83	128.28	192.52	181.54	81.28	284.81	0.8883	0.8884	
2010	81.28	107.80	14.14	17.88	12.78	18.28	1.14	0.00	4.80	11.70	248.80	140.87	183.84	183.84	0.8512	0.8444	
2011	183.84	4.51	0.00	0.19	7.37	0.00	0.00	0.00	4.80	1.17	37.40	200.80	113.28	28.24	172.47	0.8883	0.8884
2012	28.24	13.80	98.43	13.28	0.05	8.83	0.21	1.72	1.73	38.57	289.93	217.17	127.72	168.42	0.8883	0.8884	
2013	127.72	29.48	3.28	88.24	22.27	2.88	1.80	0.00	3.88	74.83	281.88	183.78	96.44	248.88	0.8423	0.8423	
2014	96.44	20.25	30.27	115.88	2.42	14.48	28.44	0.00	2.42	72.88	242.10	228.81	177.88	288.10	0.8883	0.8883	
2015	177.88	0.83	33.19	77.88	0.71	77.88	0.71	77.88	0.86	138.93	188.14	180.43	122.30	481.70	0.8418	1.1028	
Corr_Std	0.36	0.36	0.36	0.36	0.46	0.46	0.46	0.46	0.38	0.38	0.34	0.24	-0.03	0.10	0.50		
Corr_Res	0.34	0.36	0.36	0.36	0.41	0.41	0.41	0.41	0.32	0.32	0.14	0.24	-0.04	0.15	0.78		

El primer análisis de correlación de Pearson consistió en realizar una comparación entre los índices de la cronología de anillo total en su versión estándar y los valores acumulados de precipitación de septiembre del año previo a septiembre del año actual de crecimiento. Al finalizar este análisis, se realizó el mismo procedimiento para la cronología residual. Posterior a que se obtuvieron los valores de correlación, se determinó los que mostraron significancia ($p < 0.05$, $p < 0.01$), así como sus límites de confianza al mismo nivel de probabilidad. Este mismo procedimiento puede realizarse en SAS o en diversos programas estadísticos; a continuación, se determinó el período en el que la precipitación acumulada mostró mayor significancia y que fue utilizado para generar la función de transferencia. Los resultados de este proceso se muestran en el Cuadro 2. La forma gráfica de presentar la función de respuesta, puede ser mediante un gráfico de barras, donde se muestre la correlación y significancia para cada uno de los meses considerados en el estudio (Figura 7) y otra forma es uniendo los valores de correlación para cada mes, mediante una línea continua e insertando los valores de los límites de confianza (superior e inferior) y mostrando el rango mediante una línea vertical (Figura 8).

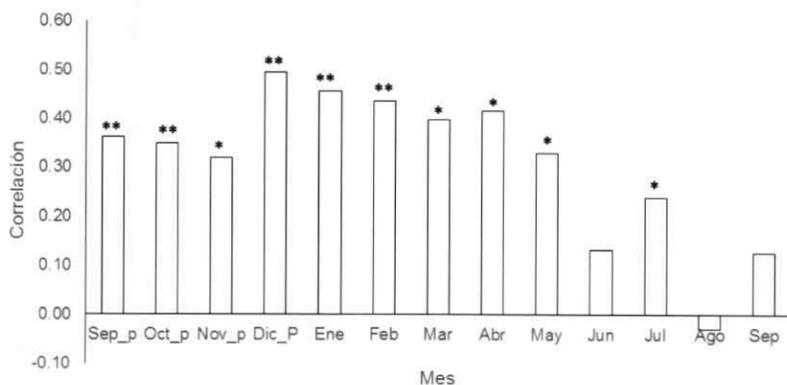


Figura 7. Correlaciones Pearson entre los valores de precipitación acumulada mensual y la cronología regional, representativa de la UMAFOR 0807 en el suroeste de Chihuahua. Un asterisco (*) indica significancia al 95% ($p < 0.05$), dos () al 99% ($p < 0.01$) y los demás no son significativos ($p > 0.05$).**

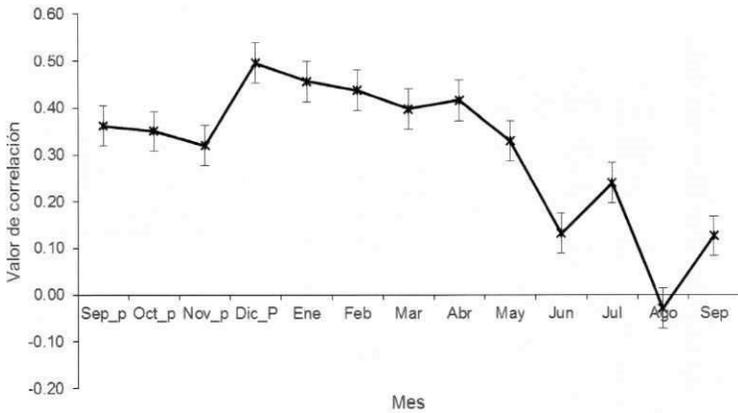


Figura 8. Correlaciones Pearson entre los valores de precipitación acumulada mensual y la cronología regional, representativa de la UMAFOR 0807 en el suroeste de Chihuahua. Las líneas verticales indican el error estándar para cada valor de correlación.

Desarrollo de la función de respuesta cuando se cuenta con registros de precipitación y de temperatura

Este segundo ejemplo, muestra los resultados generados al utilizar dos variables climáticas (precipitación y temperatura) empleando el programa PRECON. Para este caso de estudio, se consideraron cinco sitios distribuidos en la Sierra de Arteaga, municipio de Arteaga, Coahuila, en la Sierra Madre Oriental. Se obtuvieron muestras de *Pseudotsuga menziesii* en los sitios denominados El Tarillal, Los Pilares, La Viga, El Coahuilón y El Morro (Figura 9).

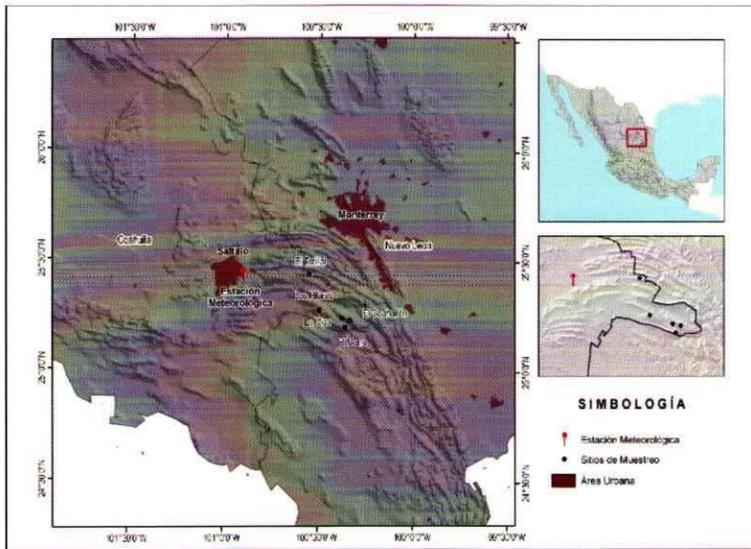


Figura 9. Localización geográfica de los sitios de estudio en Sierra de Arteaga, Coahuila, y la estación climática de donde se obtuvieron los datos meteorológicos para el desarrollo de los análisis dendroclimáticos.

Se generaron cinco cronologías de madera temprana, madera tardía y de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* para los sitios La Viga, El Coahuilón, Los Pilares, El Tarillal y El Morro. En una primera etapa, para determinar si las series dendrocronológicas presentaban una misma variabilidad común, se empleó un análisis de componentes principales. De acuerdo con el ACP, las cinco cronologías presentaron correlaciones altamente significativas ($p < 0.0001$). El componente CP1, que comprende las cinco cronologías, explicó 72% de la variabilidad, con valores de varianza de 0.91, 0.84, 0.88, 0.83 y 0.78, respectivamente (Figura 10). Con esta información se generó la base estadística para fundamentar el desarrollo de una cronología regional. La cronología regional tuvo una extensión de 302 años, que comprende el periodo de 1700 a 2001. La cronología regional de madera temprana presentó un perfecto fechado y una alta correlación entre series ($r = 0.71$, $p < 0.05$).

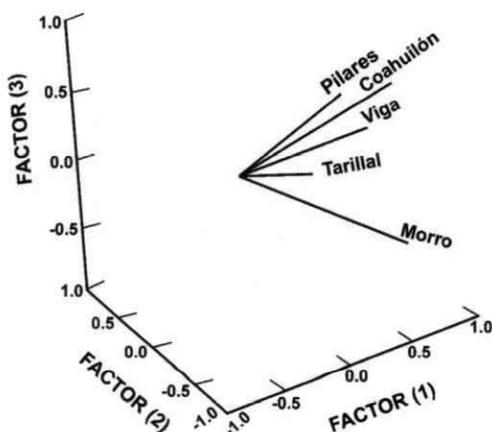


Figura 10. Análisis de componentes principales que indica una misma variabilidad de las cronologías Los Pilares, El Coahuilón, La Viga, El Tarillal, y El Morro. Todas las series se agrupan en el CP1 (Cerano et al., 2011).

La definición de las variables climáticas y el periodo de mayor influencia de dichas variables en el crecimiento del arbolado, se obtuvo al procesar una función de respuesta, la cual se generó mediante análisis de correlación entre la madera temprana y registros climáticos promedio (1950-1999) de precipitación y temperatura de la estación Saltillo, y se verificó con el programa PRECON (Fritts, 1976).

Los resultados de salida de la función de respuesta del programa PRECON, es similar a la indicada para una sola variable, se incluyen en un mismo gráfico las curvas de los valores de correlación para las dos variables (precipitación y temperatura), lo cual permite determinar directamente el valor de correlación a nivel mensual y el nivel de significancia (Figura 11). La función de respuesta involucró 14 meses, del periodo julio del año previo a agosto del año actual de crecimiento. Dicho análisis, se fundamenta en que el crecimiento algunas veces está regulado por las condiciones climáticas uno a dos años previo a la estación de crecimiento. Cuando se obtiene un coeficiente significativo del

análisis, esto implica una relación directa entre la variable climática o crecimiento previo con el ancho del anillo; mientras que un coeficiente negativo indica una relación inversa. Las letras o ceros en la parte superior de la gráfica indican un nivel de significancia al 95% (Figura 8).

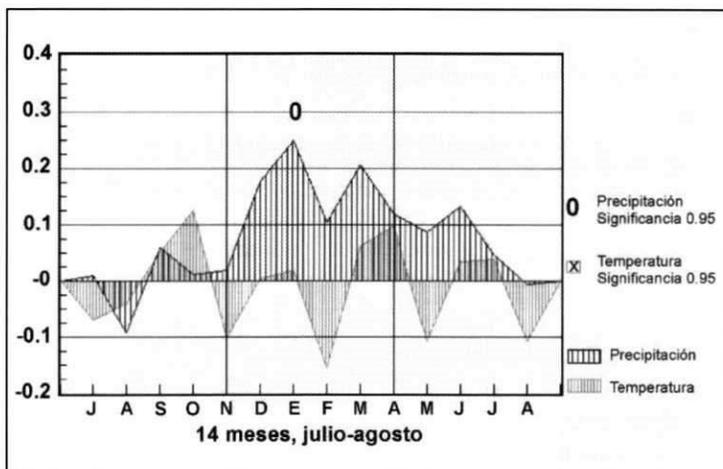


Figura 11. Función de respuesta de la cronología regional de madera temprana considerando las variables de precipitación y temperatura (Cerano *et al.*, 2011).

El análisis de función de respuesta indica que la variable con mayor influencia en el crecimiento es la precipitación, la variable precipitación en comparación con la temperatura, presenta valores de correlación positivos más altos. Los meses individuales de enero, marzo y junio registran una correlación positiva de la cronología regional de madera temprana con precipitación, pero sólo el mes de enero muestra una relación significativa ($p < 0.05$) (Figura 8); no obstante lo anterior, al realizar un acumulado de la precipitación enero-junio, que comprende la estación invierno-primavera, indica que es el periodo con mayor influencia en el crecimiento del arbolado ($r = 0.77$, $p < 0.001$) (Figura 8). Con respecto a la temperatura, aunque no se determinó influencia significativa en el crecimiento ($p > 0.05$), los meses de octubre del

año previo y marzo, abril, junio, y julio del año actual de crecimiento, presentan correlaciones positivas con el crecimiento de madera temprana, pero influencia negativa durante los meses de noviembre del año previo y febrero, mayo y agosto del año actual de crecimiento.

Para una mejor comprensión de cómo funciona este software, se pueden consultar los detalles de su funcionamiento en la página del Laboratorio de Anillos de Árboles de la Universidad de Arizona.

Determinación de la función de respuesta mediante el programa Dendroclim2002: AC++

Como se indicó previamente, existen diversos programas estadísticos disponibles para definir la función de respuesta climática para series de crecimiento arbóreo; el programa Dendroclim2002, se puede obtener de manera gratuita solicitando el software directamente al Dr. Franco Biondi, en su correo electrónico (fbiondi@unr.edu) o a través de otro medio electrónico en el cual se le pueda contactar.

Para correr el programa, se requiere que los archivos de la cronología en Excel (año e índice), se guarden en formato de lectura (.txt), lo mismo debe de hacerse con el archivo de registros de precipitación en Excel (año y 12 columnas adicionales para los meses del año), que también deben guardarse en formato de lectura (.txt). La cronología y los datos climáticos se deben de ajustar a un período común; por ejemplo 1950-2015, aun y cuando la cronología tenga una extensión generalmente mayor.

Para correr el programa, este requiere del archivo .txt de la cronología y lo mismo del archivo en .txt de precipitación, temperatura u otra variable atmosférica, ya que el programa puede integrar hasta tres variables para analizar la función de respuesta. Cuando se ingresan al programa los registros climáticos, en este caso sólo se cuenta con registros de precipitación, se tiene que indicar para el año previo, en qué mes se debe iniciar el análisis, lo mismo sucede para el año actual de crecimiento; por ejemplo, septiembre del año previo (mes 9) a septiembre (mes 9) del año actual de crecimiento); de esta forma, el período de análisis será de 1951 a 2015, ya que para analizar la influencia de las variables climáticas del año de crecimiento de

1951, utilizará datos climáticos de septiembre a diciembre del año previo (1950) y así sucesivamente hasta 2015. Con esta información, el programa solicitará se le indique en que carpeta se va a descargar el archivo de salida y al final requiere se especifique el tipo de análisis a realizar, que puede ser de "Respuesta y Correlación" o bien de "Respuesta y Correlación por Subperíodos Evolutivos" que pueden ser hacia adelante, en este caso en un subperíodo de 26 a 52 años", hacia atrás o a intervalos móviles. Se pueden realizar ambos análisis, aunque debe ser uno a la vez; es decir, primero el de correlación y luego el de subperíodos evolutivos o viceversa. En cada subrutina, el programa tiene una ayuda que facilita llevar a cabo el proceso de análisis.

Los archivos de salida del análisis de respuesta y correlación son: "s_corr.all", "s_corr.sig", "s_corr.tst", "s_resp.all", "s_resp.sig", "s_resp.tst". El primero de ellos (s_corr.all) contiene los valores de correlación de los meses seleccionados, valores que son similares a los obtenidos mediante la correlación Pearson. El segundo archivo (s_corr_sig) muestra sólo los meses con correlaciones significativas en un rango percentil del 95%. Para este caso, los meses significativos fueron de septiembre del año previo a mayo del año actual de crecimiento (Figura 12) y los valores de respuesta significativos de septiembre a mayo, excepto marzo (Figura 13). El archivo s_corr.tst contiene la prueba de significancia de las correlaciones utilizando el rango de 95% percentil. El archivo s_resp.all contiene los valores de la función de respuesta bootstrapped; por otra parte el archivo s_resp.sig muestra los meses con valores significativos de función de respuesta en un rango percentil del 95% y finalmente el archivo s_resp.tst muestra los valores de significancia de la prueba de respuesta bootstrap.

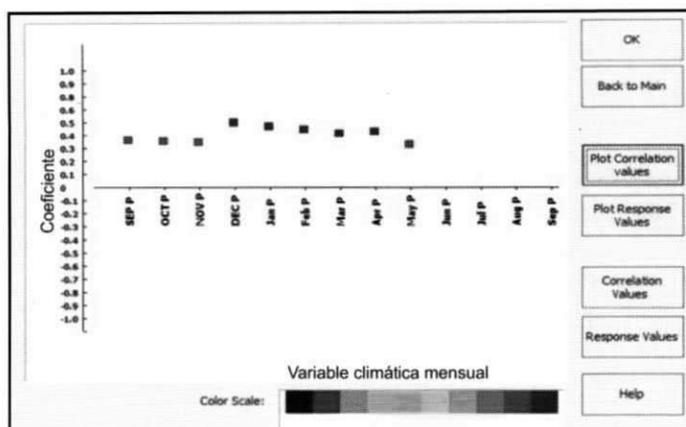


Figura 12. Gráfico de salida del programa de función de respuesta Dendroclim, que señala los valores de correlación entre la cronología estándar de la UMAFOR 0807 y los datos regionales de precipitación mensual del periodo estacional de septiembre del año previo a septiembre del año actual de crecimiento.

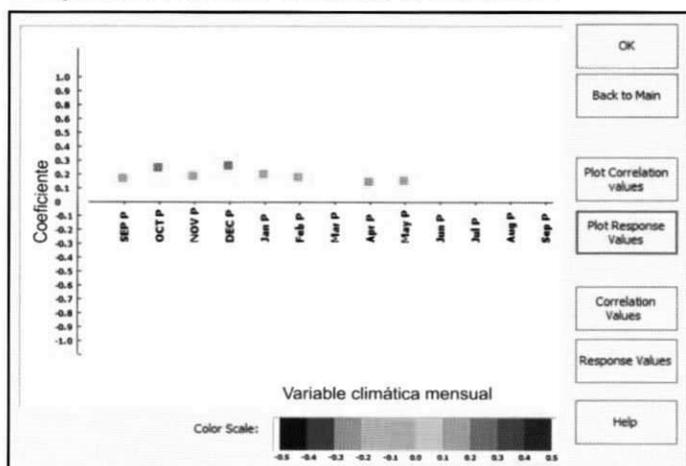


Figura 13. Valores de correlación de la función de respuesta con datos de precipitación mensual de la cronología regional para la UMAFOR 0807 y datos de precipitación mensual de septiembre del año previo a septiembre del año actual de crecimiento. La precipitación de los meses del año con mayor influencia en el crecimiento son octubre y diciembre del año previo al inicio del crecimiento.

Para el análisis evolutivo de respuesta y de correlación, el programa Dendroclim2002 tiene la opción para elegir períodos de análisis hacia adelante, hacia atrás o bien a intervalos movibles, cualquiera opción que se elija, debe considerar para este ejemplo subperíodos entre 26 y 52 años y los resultados de correlación y de respuesta se producen para cada año y período de meses considerado. El programa muestra de forma gráfica e ilustrada a colores las correlaciones y respuestas no significativas y significativas a través de los subperíodos elegidos. Esto ayuda a analizar a través del tiempo, si las correlaciones y respuestas para meses particulares son constantes en el tiempo, o cambian para ciertos subperíodos en función a la variabilidad de la variable en estudio.

Interpretación de los resultados de función de respuesta climática

La interpretación de la función de respuesta de una serie de crecimiento a variables climáticas obtenida con cualesquiera de los modelos descritos para este propósito es muy variable y está sujeta al conocimiento que tenga el investigador del clima a nivel local o regional, entendimiento del cambio climático, del ciclo hidrológico, capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, demanda evapotranspirativa, comportamiento fisiológico de las especies estudiadas, entre otros aspectos de manejo, que pudieran provocar respuestas diferentes acorde al grado en que interactúan las diversas variables involucradas (Baker et al., 2015). Este análisis interpretativo debe fundamentarse en información bibliográfica generada para la especie, así como por las aportaciones que pudieran tener expertos en cada uno de los temas que inciden en la respuesta de la especie.

Para las condiciones ecológicas dominantes donde habitan diversas especies de coníferas con potencial dendrocronológico, cuyo hábitat son los climas templados del centro y norte de México, la formación de madera temprana tiene influencia de las condiciones climáticas predominantes en el período de invierno-primavera (Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano *et al.*, 2010; Villanueva *et al.*, 2015; Carlón-Allende *et al.*, 2018). Esta respuesta parece derivarse de la baja intensidad que caracteriza a las lluvias invernales, que generalmente no superan la tasa de infiltración del

agua en el suelo, lo que permite su almacenamiento en la matriz del suelo para su uso posterior. Al iniciar la estación de crecimiento a finales de marzo y principios de abril, existe humedad disponible en el suelo para el desarrollo de la madera temprana, cuyo crecimiento dependerá de la lámina almacenada en el perfil del suelo, de la caída de nieve y de las lluvias que pudieran ocurrir durante este período. Por otra parte, el tamaño de la madera tardía, depende más de la humedad que ocurre durante el verano producto de las lluvias monzónicas, tormentas tropicales y huracanes, lo cual favorece mayor o menor desarrollo de esta banda de crecimiento (Griffin *et al.*, 2011). El crecimiento de anillo total, integra tanto las condiciones climáticas prevalecientes en el período invierno-primavera como durante el verano (St. George, 2014; Torberson *et al.*, 2016) y en general es de las más utilizadas para reconstrucciones dendroclimáticas, donde se ha determinado que para ciertas especies particularmente pinos piñoneros, su crecimiento anual está más influenciado por la precipitación acumulada anual (Constante *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2009).

Función de transferencia

La función de respuesta indica los meses o períodos en los cuales ciertas variables influyen más en el crecimiento de una especie o de un grupo de especies. Sin embargo, esta repuesta no necesariamente tiene que integrar meses consecutivos; de tal forma que, por ejemplo, la serie dendrocronológica o los índices del primer componente generados mediante el análisis de componentes principales pueden responder a la precipitación septiembre del año previo a mayo del año actual de crecimiento, donde algunos meses pueden no ser significativos. Sin embargo, al relacionar la serie dendrocronológica con la precipitación acumulada de dicho período, puede resultar de mayor significancia que para otros períodos estacionales más cortos. Con base a esta relación, se genera un modelo lineal o múltiple con el cual será factible realizar la reconstrucción climática.

Lo anterior, se ejemplifica con la cronología regional para la UMAFOR 0807 en el suroeste de Chihuahua, donde la serie de crecimiento mostró asociación positiva de septiembre del año previo a septiembre del año actual de crecimiento, excepto para el

mes de agosto (Figura 12, Figura 13). La relación entre ambas variables se muestra en la figura 14, donde claramente se observa una tendencia lineal. De esta manera, se corre un análisis de regresión entre ambas variables y se genera un modelo lineal con fines de reconstrucción. La correlación entre ambas variables para este caso es de 0.81 para el período 1951-2015, lo que indica que los crecimientos de los árboles en esta región captan 66% de la variabilidad de la precipitación en el período señalado (septiembre del año previo a mayo el año actual de crecimiento). El modelo que se genere de esta relación, se debe de calibrar en la mitad de los datos climáticos y verificar en la mitad restante, para lo cual, se utilizan estadísticos como prueba de "t", prueba de signos, diferencia mínima significativa, entre otras pruebas estadísticas (Fritts, 1976). Así mismo, los datos reconstruidos deben ser verificados en lo posible con documentos históricos, registros de producción de alimentos, otras reconstrucciones dendroclimáticas regionales o bien mediante reconstrucciones paleoclimáticas con otros "proxys" del clima (Fritts, 1976).

Consideraciones finales

La función de respuesta de una serie de anillos de crecimiento a variables climáticas, determina los meses o períodos a los cuales responde el crecimiento anual de una especie o de un grupo de especies integradas en una serie de crecimientos; también si esa respuesta es constante o varía a través de la vida de la especie influenciada por la edad (Dorado-Liñan *et al.*, 2012).

Las variables climáticas más utilizadas para definir su influencia en el crecimiento son precipitación acumulada mensual, estacional, anual y temperatura (máxima, mínima, media), pero otras variables, como humedad relativa, presión atmosférica, entre otras más, también puede ser integradas en este tipo de análisis. La función de respuesta permite determinar las variables que más influyen en el crecimiento y los meses o períodos estacionales en las que algunas de estas variables pueden ser reconstruidas; así mismo, permite definir si los cambios en la intensidad de algunas de estas variables pueden afectar el funcionamiento fisiológico de las especies, su dinámica estructural y desarrollo; en particular, al involucrar el calentamiento global.

La función de respuesta es fundamental para desarrollar reconstrucciones dendroclimáticas, pero también es importante para definir las variables que más influyen en el crecimiento de las especies y el período en que ejercen su mayor influencia en su desarrollo. Esta información es de utilidad con fines de manejo forestal, por ejemplo, eliminando competencia intraespecífica e interespecífica, favoreciendo almacenamiento del agua en el suelo y permitiendo mejorar su contenido en materia orgánica, conservación de suelo, entre otras acciones de manejo.

La determinación de la función de respuesta en especies arbóreas, se facilita con adecuada disponibilidad de datos climáticos, extensos (>50 años) y con representatividad de las diversas condiciones donde se desarrollan las especies forestales, ya que actualmente los registros climáticos proceden de estaciones con escasa representatividad, lo que limita obtener una adecuada función de respuesta, no obstante que las series de crecimiento muestren alta sensibilidad.

Los avances tecnológicos desarrollados en término de apoyos computacionales y generación de software para análisis de la función de respuesta, contribuyen a generar mejores análisis estadísticos de la relación clima-crecimiento. La interpretación de estos resultados, sin embargo, es responsabilidad de los estudiantes o investigadores involucrados en este tipo de análisis, que deben considerar una serie de factores para hacer una adecuada interpretación de la respuesta de la especie o especies involucradas en este tipo de análisis.

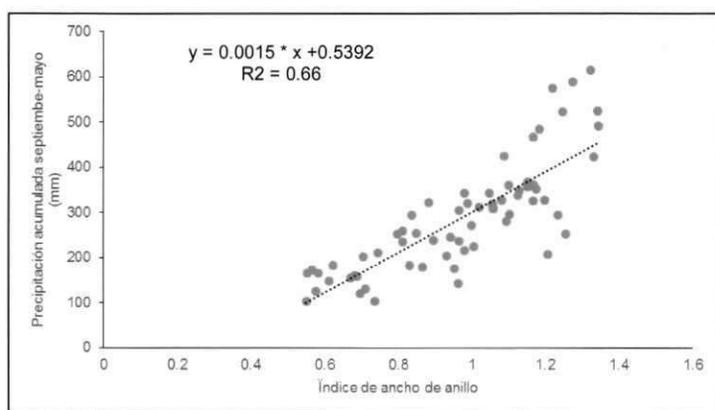


Figura 14. Relación entre el ancho de anillos y la precipitación acumulada septiembre del año previo a mayo del año actual de crecimiento. La línea punteada es una línea de tendencia ajustada a las observaciones.

Literatura citada

- Baker, J.C.A., S.P.F. Hunt, S.J. Clerici, R.J. Newton, S.H. Bottrell, M.J. Leng, T.H.E. Heaton, G. Gelle, J. Argollo, M. Gloor, R.J.W. Brienen. 2015. Oxygen isotopes in tree rings show good coherence between species and sites in Bolivia. *Global Planetary Change* 133: 298-308.
- Biondi, F., K. Weikul. 2004. DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring. *Computer and Geosciences* 30: 303-311.
- Biondi, F., P. Hartsough. 2010. Using automated point dendrometers to analyze tropical treeline stem growth at Nevado de Colima, Mexico. *Sensors* 10 (6): 5827-5844.
- Brienen, R.J.W., E. Lebrija-Trejo, M. van Brougel, A. Pérez-García, F. Bongers, J.A. Meave, M. Martínez-ramos. 2009. The potential of tree rings for the study of forest succession in southern Mexico. *Biotropica* 41(2): 186-195.
- Carlón-Allende, J. Villanueva-Díaz, M.E. Mendoza, D.R. Pérez-Salicrup. 2018. Climate signal in earlywood and latewood in conifer forests in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Tree-Ring Research* 74(1); 63-75. DOI: <http://dx.doi.org/10.3959/1536-1098-74.1.63>.
- Cerano Paredes, J., J. Villanueva D., P.Z. Fulé. 2010. Reconstrucción de incendios y su relación con el clima para la reserva Cerro El Mohinora, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1): 89-103.
- Cerano Paredes, J., J. Villanueva D., R.D. Valdéz C., E.H. Cornejo O., I. Sánchez C., V. Constante G. 2011. Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(4): 32-46

- Cleaveland, M.K., D.W. Stahle, M.D. Therrell, J. Villanueva D., B.T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369-388.
- Constante García, V., J. Villanueva D., J. Cerano P., E. Cornejo O., S. Valencia M. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. Reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Revista de Ciencia Forestal en México* 34(106): 17-39.
- Cook, E.R., N. Pederson. 2011. Uncertainty, emergence, and statistics in dendroclimatology. Pp. 77-112. In: M.K. Hughes, T.W. Swetnam, H.F. Díaz (Editores), *Dendroclimatology: progress and prospects Volume II*. Springer, Dordrecht Heidelberg London New York. 365 p.
- Cropper, J.P. 1985. Tree-ring response functions: an evaluation by means of simulations. Ph.D. Thesis. Department of Geosciences. University of Arizona. 132 p.
- David, M., NASA/GSFC/HSL. 2012. NLDAS Primary Forcing Data L4 Monthly 0.125 x 0.125 degree V002, Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [27 August 2018], 10.5067/Z62LT6J96R4F.
- Dorado-Liñan, I., E. Gutiérrez, I. Heinrich, L. Andreau-Hayles, E. Muntain, F. Campleo, G. Helle. 2012. Age effects and climate response in trees: a multi-proxy tree-ring test in old growth life stages. *European Journal of Forest Research* 131:933-944 Doi: 10.1007/s10342-011-0566-5.
- ERIC III Versión 3.2. 2013. Extractor rápido de información climatológica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. CONAGUA. Jiutepec, Morelos.

- Fritts, H. C. 1962. The relation of growth ring widths in American beech and white oak to variations in climate. *Tree-Ring Bulletin*, 25(1-2):2-10.
- Fritts, H.C. 1976. *Tree-rings and climate*. Academic Press, New York. 567 p.
- Griffin, D., D.M. Meko, R. Touchan, S.W. Leavitt, C.A. Woodhouse. 2011. Latewood chronology development for summer-moisture reconstruction in the US Southwest. *Tree-Ring Research* 67(2): 87-101.
- Jolliffe I.T. 1986. *Principal Component Analysis and Factor Analysis*. In: *Principal Component Analysis*. Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY.
- Hair, J., E., Anderson, L., Tatham, W., Black. 1999. *Análisis Multivariante*. 5a. ed. Prentice Hall. Madrid.
- Holmes, R.L. 1994. *Dendrochronology Program Library-USERS Manual*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, AZ. 41 p.
- Mocko, D. 2012. NLDAS Primary Forcing Data L4 Monthly 0.125 x 0.125 degree V002, Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), NASA/GSFC/HSL. Accessed: [Data Access Date], 10.5067/Z62LT6J96R4F.
- Montgomery, D.C., E.A. Peck. 1982. *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley. New York, Brisbane. 504 p.
- NASA, 2018. *The Bridge Between Data and Science v 4.28*". https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=HvLt&starttime=&endtime=&data=GLDAS_NOAH025_M_2_0_Rainf_tavg%2CNLDAS_FORA0125_M_002_apcpsfc&variableF_acets=dataFieldMeasurement%3APrecipitation%3B.

- Roig, F.A., J. Villanueva D., J. Jiménez O., W. John Hayden, J. Barajas M., B.H. Luckman. 2012. Anatomía de maderas en comunidades rurales de Yucatán. Libro Técnico No. 4. INIFAP CENID RASPA, Gómez Palacio, Durango. 242 p.
- Schweingruber, F.H. 1996. Tree rings and environment. Dendroecology. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stuttgart, Haupt. 609 p.
- Smith, L.I. 2002. A tutorial on Principal Components Analysis (Computer Science Technical Report No. OUCS-2002-12). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10523/7534>.
- St. George, S. 2014. An overview of tree-ring width records across the Northern Hemisphere. *Quaternary Science Reviews* 95: 132-150.
- Stahle D.W., J. Villanueva, M.K. Cleaveland, M.D. Therrell, G.J. Paull, B.T. Burns, W. Salinas, H. Suzan, and P.Z. Fule. 2000. Recent tree-ring research in Mexico. P. 285-306. En F. A. Roig (compilador). *Dendrocronología en América Latina*. EDIUNC. Mendoza, Argentina.
- Stahle, D.W., E.R. Cook, D.J. Burnette, J. Villanueva, J. Cerano, J.N. Burns, D. Griffin, B.J. Cook, R. Acuña, Max C.A. Torbenson, P. Szejner, J.M. Howard. 2016. The Mexican drought atlas: tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Review* 149: 34-60.
- Stokes, M.A. and T.L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. The University of Chicago. 73 p.

- Teran Cuevas, A. 2010. Análisis de escenarios de lluvia en México. Doctorado. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD). 170 p.
- Torberson, M.C.A., D.W. Stahle, J. Villanueva D., E.R. Cook, D. Griffin. 2016. The relationship between earlywood and latewood ring-growth across North America. *Tree-Ring Research* 72(2): 53-66.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano P., V. Constante G., P.Z. Fulé, E. Cornejo O. 2009. Variabilidad hidroclimática histórica de la Sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques* 15(3): 45-64.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano P., P.Z. Fulé, C. Cortés M., L. Vázquez S., L.L. Yocom, J.A. Ruiz C. 2015. Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 87: 141-153.
- Villaseñor, J.L., Ortiz, E., Alvarado, L., Mora, M. y G. Segura. 2013. La flora arbórea de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto JE012. México, D. F.
- Wickham, H. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <http://ggplot2.org>.
- Wigley, T.M.L., K.R. Brifa and P.D. Jones. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *American Meteorological Society* 23: 201-213.

Xia, Y., K. Mitchell, M. Ek, J. Sheffield, B. Cosgrove, E. Wood, L. Luo, C. Alonge, H. Wei, J. Meng, B. Livneh, D. Lettenmaier, V. Koren, Q. Duan, K. Mo, Y. Fan, and D. Mocko. 2012. Continental-scale water and energy flux analysis and validation for the North American Land Data Assimilation System project phase 2 (NLDAS-2): 1. Intercomparison and application of model products, *J. Geophys. Res.*, 117, D03109, doi: 10.1029/2011JD016048.

Agradecimientos

Para el desarrollo del presente folleto se contó con apoyo económico del proyecto 283134 apoyado con fondos sectoriales SEP-CONACYT "Red dendrocronológica mexicana: aplicaciones hidroclimáticas y ecológicas", así mismo, con fondos fiscales del INIFAP del proyecto denominado "Reconstrucción de caudales e influencia de fenómenos de circulación general en cuencas con origen en la Sierra Madre Occidental", SIGI 11583934415.

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Centros Nacionales de Investigación Disciplinaria, Centros de Investigación Regional y Campos Experimentales



- Sede de Centro de Investigación Regional
- Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
- Campo Experimental

COMITÉ EDITORIAL DEL CENID-RASPA

Presidente: Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Secretario: Dr. Juan Estrada Ávalos

Vocales: M.C. Miguel Rivera González

M.C. Gerardo Esquivel Arriaga

Revisores técnicos

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

M.C. Gerardo Esquivel Arriaga

Edición y Diseño

M.C. Aldo Rafael Martínez Sifuentes

La presente publicación se terminó de imprimir el mes de junio del año 2019 en los talleres de Carmona Impresores S.A. de C.V., Calzada Lázaro Cárdenas No. 850. Colonia Eduardo Guerra. C.P. 27280 Torreón Coahuila, México. Su tiraje consta de 500 ejemplares.

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN LA
RELACIÓN AGUA SUELO PLANTA ATMÓSFERA**

Dr. Juan Estrada Ávalos
Director
Ing. Armando Estrada González
Jefe de Operaciones
Lic. Flor Carina Espinoza Delgadillo
Jefe Administrativo

Personal Investigador

M.C. Palmira Bueno Hurtado
Dr. Ernesto Alonso Catalán Valencia
Dr. Julián Cerano Paredes
M.C. Vicenta Constante García
M.C. Gerardo Delgado Ramírez
M.C. Gerardo Esquivel Arriaga
Dr. Juan Estrada Ávalos
Dr. José Luis González Barrios
Dr. Guillermo González Cervantes
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra
M.C. Rosario Jacobo Salcedo
M.C. Hilario Macías Rodríguez
Dr. Jesús Arcadio Muñoz Villalobos
Dra. Erika Nava Reyna
M.C. Cristo Omar Puente Valenzuela
M.C. Miguel Rivera González
Dr. Ignacio Sánchez Cohen
M.C. Ramón Trucios Caciano
Dra. Ma. Magdalena Villa Castorena
Dr. José Villanueva Díaz

WWW.INIFAP.GOB.MX

El conocimiento de la función de respuesta de las especies que producen anillos de crecimiento anual a variables climáticas, constituye información fundamental de importancia con fines de reconstrucción hidroclimática, en particular, en áreas donde no se cuenta con información de este tipo o los registros existentes son muy cortos, no representativos o de calidad dudosa. Así mismo, el entendimiento de esta respuesta es de utilidad con fines de manejo, conservación de especies y del impacto que ejerce en su desarrollo los cambios climáticos atribuidos a acciones antropogénicas. En este folleto, se discuten las técnicas más utilizadas para obtener la función de respuesta, pero su interpretación depende en gran medida del conocimiento del personal técnico que la interpreta; no obstante, lo anterior se considera que este documento es de utilidad práctica para personal técnico y tomadores de decisiones, que podrán encontrar en el mismo, los fundamentos básicos para determinar las variables climáticas que más influyen en el desarrollo de una especie.

SADER

SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y DESARROLLO RURAL



inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias