



Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México

Landscape spatial analysis as a base for dendrochronological sampling: The case of the Biosphere Reserve of Monarch Butterfly, Mexico

Teodoro Carlón-Allende¹, Manuel E. Mendoza¹, José Villanueva-Díaz² y Diego R. Pérez-Salicrup³

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Michoacán, México. mmendoza@ciga.unam.mx
*Autor de correspondencia. tcarlon@pmip.unam.mx

²INIFAP, Centro Nacional de Investigación Disciplina-
ria Relación Agua-Suelo Planta-Atmósfera, Durango,
México. villanueva.jose@inifap.gob.mx

³Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universi-
dad Nacional Autónoma de México (UNAM), Michoa-
cán, México. diego@cieco.unam.mx

RESUMEN

El análisis espacial del paisaje, con técnicas de Percepción Remota (PR) y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), es un procedimiento poco usado en la identificación de sitios potencialmente idóneos para el muestreo dendrocronológico. En el presente trabajo se diseñó un protocolo para identificar áreas con árboles climáticamente sensibles, empleando un análisis espacial de variables biofísicas. El diseño consistió en el análisis de la pendiente del terreno, la orientación de laderas y la distribución de Cobertura Vegetal y Uso de Suelo (CVUS), mediante el uso de técnicas de PR y herramientas de SIG. El protocolo se validó mediante un muestreo dendrocronológico en dos sitios adyacentes. Los análisis estadísticos del ancho de anillos de crecimiento se realizaron mediante los programas COFECHA y dplR. Los resultados indicaron que 18% de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca presenta características aptas para coleccionar muestras dendrocronológicas sensibles a variación climática. Los análisis estadísticos indican que existen diferencias entre los dos sitios en edad de árboles, diámetro y ancho de los anillos. La propuesta del diseño de muestreo permitió ubicar sitios con árboles longevos y sensibles, lo que se traduce en alta variación interanual en el ancho de anillos. El análisis espacial de variables biofísicas previas al muestreo dendrocronológico, contribuye a la identificación de sitios con árboles sensibles y a eliminar menos muestras. El protocolo propuesto es eficiente y puede ser replicable en otras áreas.

PALABRAS CLAVE: Cobertura vegetal y uso de suelo, datos biofísicos, dendroclimatología, Análisis espacial.

ABSTRACT

Landscape spatial analyses using Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) has been scarcely used to identify sites with dendrochronological potential. For this study, we designed a protocol to identify areas with climatically sensitive trees, based on the spatial analysis of landscape biophysical features. The protocol included the analyses of slope angles, slope aspect, and the distribution of Land Cover and Land Use (LCLU) using RS and GIS tools. The protocol was validated through dendrochronological sampling in two adjacent sites. Analyses of tree ring widths were done using COFECHA and dplR. Results suggest that sensitive trees grow in 18% of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve. Trees from the two sites differed in age, diameter, and mean ring width. Our protocol allowed us to identify sites with long-lived and sensitive trees as represented by the high inter-annual variation found in tree ring widths. The spatial analysis of biophysical variables prior to sampling enables the identification of sites with sensitive trees implying the elimination of less samples. Our proposed protocol is efficient and can be used in other areas.

KEY WORDS: Forest cover and land use, biophysical data, dendroclimatology, spatial analysis.

INTRODUCCIÓN

El análisis espacial de variables físicas, derivadas de un Modelo Digital de Elevación (MDE), como son la pendiente del terreno y la orientación de laderas, así como de la Cobertura Vegetal y Uso de Suelo (CVUS), son utilizados con frecuencia en estudios de cuantificación y explicación del cambio de CVUS, de determinación de biomasa, de degradación de bosques, en estudios hidrológicos y en los programas de manejo de recursos naturales (Guimet, 1992; Sample, 2004; Mendoza *et al.*, 2011; Bravo *et al.*, 2012). Sin embargo, este tipo de análisis ha sido poco utilizado en estudios dendrocronológicos, en los que es fundamental identificar sitios con árboles sensibles a variables climáticas. Esto puede deberse a la poca relevancia otorgada a los análisis espaciales con herramientas de Percepción Remota (PR) y Sistemas de Información Geográfica (SIG), con los cuales es posible determinar la ubicación de áreas boscosas con mayor probabilidad de contener árboles climáticamente sensibles y longevos.

Se les llama climáticamente sensibles a los árboles que presentan variación interanual en el ancho de sus anillos en respuesta a factores climáticos (Fritts, 1976; Speer, 2010). La variación en el ancho del anillo se conoce como sensibilidad y se puede estimar mediante una inspección visual o a partir de mediciones de ancho de los anillos. Estas variaciones se pueden expresar estadísticamente como sensibilidad media y son una medida de las diferencias relativas de la anchura entre anillos (Fritts, 1976). La variación anual en el ancho de los anillos puede deberse a una serie de variables que influyen en el crecimiento de los árboles. Estas pueden incluir la topografía, la especie muestreada, la edad del árbol, y la disponibilidad de nutrientes almacenados en el árbol y el suelo. Pero también pueden reflejar la variación en factores climáticos como la precipitación, la temperatura, el viento, la humedad y la insolación (Bradley, 1999; Fekedulegn *et al.*, 2003; Liang *et al.*, 2006; Speer, 2010). Las diferencias espaciales en las variables físicas como la pendiente del terreno y la orientación de laderas también influyen en el crecimiento de los árboles (Makinen *et al.*, 2002; Liang *et al.*, 2006; Barij *et al.*, 2007; Speer, 2010). Por ejemplo, la

pendiente del terreno está estrechamente relacionada con la profundidad del suelo, el contenido de humedad y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Hairston y Grigal, 1991 y Fekedulegn *et al.*, 2003). Por lo tanto, en áreas con pendientes escarpadas se tienen contenidos de humedad más bajos que en áreas con poca pendiente o sin pendiente, debido a que en las áreas con pendientes escarpadas, los escurrimientos son mayores y se limita la infiltración. En consecuencia, los árboles que se encuentren en pendientes más escarpadas presentan un crecimiento más lento y los anillos de los árboles son más sensibles a periodos con condiciones hidrológicas limitantes (Hairston y Grigal, 1991). También la orientación de las laderas influye sobre la radiación solar incidente y por lo tanto, sobre la evapotranspiración. Para el caso del hemisferio norte las laderas que se encuentran orientadas al sur, sureste y suroeste reciben mayor radiación solar y presentan menor contenido de humedad en comparación con las laderas orientadas al norte, noreste y noroeste, traduciéndose en mayor sensibilidad de los árboles a años o periodos secos en las laderas con algún tipo de orientación sur (Thomas, 2004). Por último, la distribución de la cubierta forestal, su conservación, longevidad y la variación interanual en los anillos de crecimiento están estrechamente relacionadas con las características topográficas, tales como, la pendiente y orientación de laderas que determinan en gran medida la disponibilidad de agua (Fritts, 1976; Vaganov *et al.*, 2006; Bunn *et al.*, 2011).

Para el caso de los muestreos dendrocronológicos no hay estudios que hayan considerado un análisis espacial de variables biofísicas con base en productos y técnicas de PR y herramientas de análisis espacial dentro de un SIG como insumo previo al muestreo dendrocronológico. El supuesto del presente trabajo, es que este tipo de análisis permite ahorrar tiempo y recursos económicos en la determinación de sitios óptimos para el muestreo dendrocronológico. En el norte y centro de México se han realizado muestreos dendrocronológicos dirigidos, con base en la experiencia de los investigadores y pláticas previas con ejidatarios y prestadores de servicios técnicos forestales, donde se eligen los rodales a muestrear, pero sin un cono-



cimiento previo espacial de las variables biofísicas del sitio a estudiar, con lo cual les permita maximizar el muestreo de árboles sensibles, y así eliminar menor cantidad de muestras (Huante *et al.*, 1991; Bernal y Salazar, 2000; Villanueva *et al.*, 2009).

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) es un área natural protegida de alta prioridad para América del Norte y para el mundo, ya que alberga a las colonias de millones de mariposas Monarca (*Danaus plexippus L.*) que migran desde Canadá y Estados Unidos de América cada invierno (NAMCP, 2008). En las últimas décadas, la RBMM ha sufrido un deterioro acelerado en la calidad y cantidad de sus recursos naturales, situación que se atribuye principalmente a cambios en el uso de suelo (Brower *et al.*, 2002). Estos impactos son originados principalmente por actividades antropogénicas entre las que se encuentran el pastoreo, la extracción de madera y productos forestales no maderables y la expansión de la superficie aguacatera (observación en campo, 2014). Estos cambios pueden derivar en la pérdida de la biodiversidad, y se ha planteado que también pueden modificar el patrón climático a nivel regional (IPCC, 2013). Uno de los problemas más latentes es la variación climática, de la cual se carece de información a escalas espacio-temporales principalmente en lugares donde la densidad de registros instrumentales es deficiente y donde las series temporales son muy cortas. Por lo tanto, resulta trascendente entender los cambios espacio-temporales de la variación climática y conocer si esta variación se encuentra en un periodo histórico de variación natural (Mann *et al.*, 1998). Debido a la ausencia de datos climáticos históricos previos a la segunda mitad del siglo XX (Jáuregui, 2004), es necesario el uso de fuentes indirectas, como series de tiempo dendrocronológicas, con el fin de conocer las variaciones climáticas del pasado (Bradley, 1999; Trenberth y Otto-Bliesner, 2003; Hughes, 2011). Sin embargo, la eficiencia de los muestreos dendroclimáticos, requiere de la identificación de los árboles longevos y sensibles a variables climáticas mediante otras técnicas y herramientas. Estas técnicas bien puede ser la PR y las herramientas de análisis espacial dentro de los SIG, con las cuales se puede analizar y modelar variables

biofísicas de las que se conoce que influyen en el crecimiento de los árboles, y de esta forma hacer más eficientes los muestreos dendroclimáticos.

OBJETIVO

El objetivo del presente estudio fue desarrollar un protocolo para identificar áreas con presencia de árboles climáticamente sensibles en función de variables biofísicas del paisaje por medio del uso de técnicas de PR y herramientas de análisis espacial como los SIG.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La RBMM se localiza en los estados de Michoacán de Ocampo y Estado de México, abarca parte de diez municipios, cubre una superficie de 562 km² y forma parte del Sistema Volcánico Transversal. Sus coordenadas mínimas son 19° 18' 32''N y, 100° 09' 07''W y máximas 19° 44' 27''N y, 100° 22' 26''W (DOF, 2000) (Fig. 1).

El área se caracteriza por la presencia de cuerpos volcánicos que se originaron entre el Cenozoico medio y tardío, donde afloran, principalmente, rocas ígneas extrusivas (basaltos, riolitas y tobas), sobre las cuales se desarrollan diversos tipos de suelo, clasificados como: Andosol, Luvisol, Acrisol y Litosol (INEGI, 1982).

La altitud varía de 2030 m a 3640 m snm lo que le confiere un marcado gradiente altitudinal. La temperatura media oscila entre 8 °C y 22 °C y la precipitación anual varía entre 700 mm y 1250 mm, desarrollándose un clima semifrío subhúmedo con verano fresco Cb'(w2) y uno templado subhúmedo C(w1) (García, 1981).

La vegetación corresponde a bosque de pino-encino y bosques de oyamel en las partes más altas, mientras que en las partes bajas corresponde a agricultura, pastizales, arbustos, asentamientos humanos y cuerpos de agua (Brower *et al.*, 2002; Giménez *et al.*, 2003).

Clasificación y ponderación de datos biofísicos

La identificación de la distribución de la CVUS se basó en el uso de imágenes SPOT 5 pancromáticas de 2.5 m de

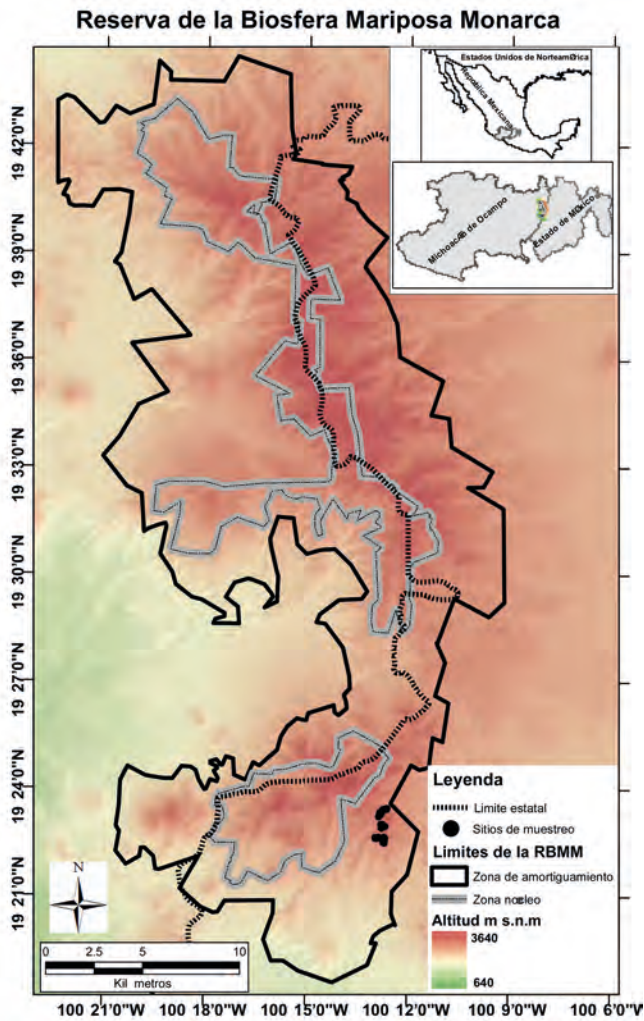


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio, Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca en los estados de Michoacán y Estado de México. El presente estudio se centró en el Corredor Chincua-Campanario-Chivatí-Huacal y Cerro Pelón dejando fuera la parte del cerro Altamirano, que no se muestra en esta figura.

resolución y multispectrales de 10 m de resolución de diciembre 2010 y enero 2011. Estas imágenes se fusionaron con el objetivo de generar una imagen sintética, lo que permitió obtener una imagen de 2.5 m de resolución con un contraste cromático de la multispectral, que mejoró la interpretabilidad de los datos de CVUS (Chuvienco, 2008).

La interpretación de la CVUS se llevó a cabo mediante una digitalización en pantalla a escala 1:15 000 utilizando como referencia, la base de datos de CVUS del año 2009,

generada por personal de la RBMM, en conjunto con el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA).

La pendiente del terreno y la orientación de laderas, se realizó aplicando filtros direccionales al MDE, el cual se derivó del continuo de datos topográficos a escala 1:50 000 (INEGI, 1995).

Las categorías de los datos espaciales de CVUS, la pendiente de terreno y la orientación de laderas, se obtuvieron a partir de la reclasificación de los datos de cada variable. Los mapas reclasificados se les dieron valores de ponderación por método de asignación directa (0 a 10), donde 0 son las áreas no aptas y 10 son las áreas muy aptas. En el presente estudio, solo se consideraron valores de ponderación superiores a ocho (Fig. 2). La ponderación se realizó considerando las tres variables (Pendiente de terreno mayor a 20°, laderas orientadas al sur, sureste y suroeste, y coberturas boscosas de pino-encino y oyamel), ya que estas variables han sido documentadas como variables que influyen en el crecimiento de los árboles y por lo tanto, en la variación en el ancho de los anillos de los árboles (Fritts, 1976; Speer, 2010).

Modelado de datos biofísicos

Se modelaron las áreas donde deberían crecer los árboles más longevos y con mayor sensibilidad climática expresada como variaciones interanuales en el ancho de sus anillos (Fig. 2). El modelado consistió en un análisis espacial multicriterio mediante la asignación directa de pesos de ponderación y la sobreposición de las tres variables (Pendiente de terreno mayor a 20°, laderas orientadas al sur, sureste y suroeste, y coberturas boscosas de pino-encino y oyamel). El modelaje se realizó por medio de una suma lineal de las tres variables de acuerdo a la siguiente ecuación (Bonham-Carter, 1994).

$$Map = (OI + Pt + Cob) / n$$

Donde:

Map: mapa con áreas de muestreo de mayor sensibilidad climática

OI: orientación de laderas

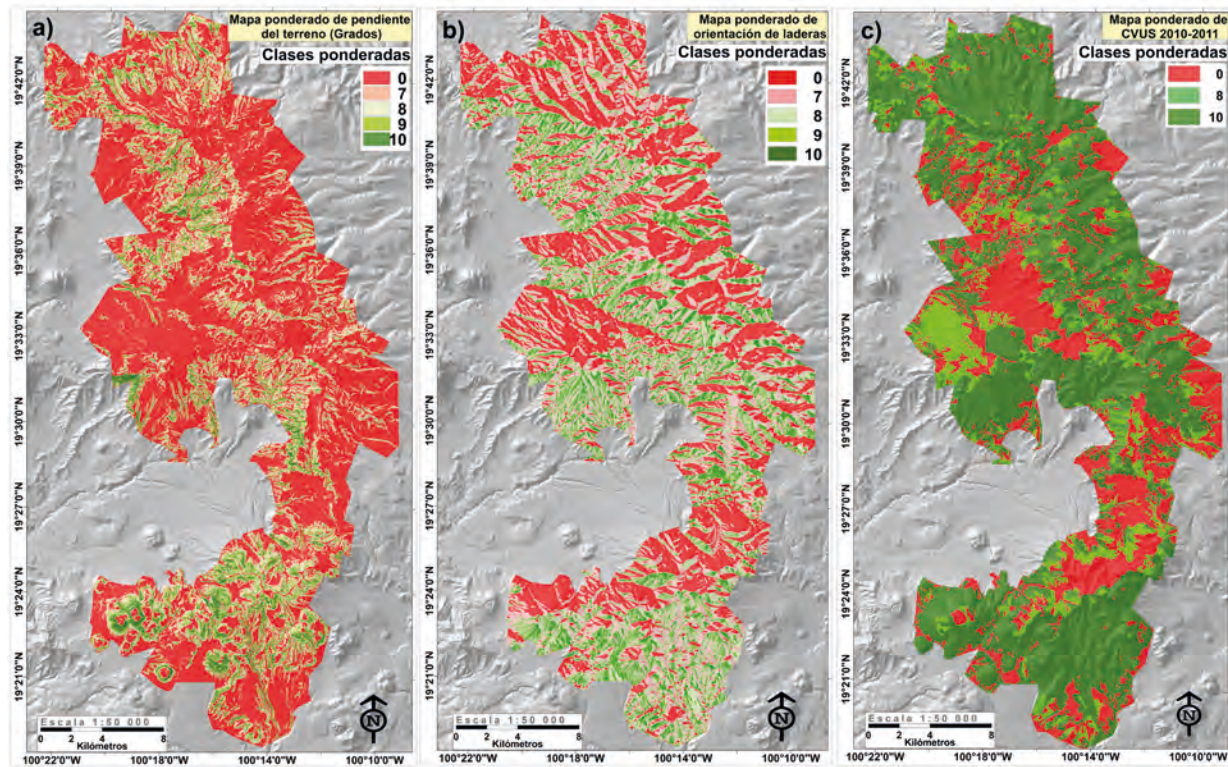


FIGURA 2. Mapas de clases ponderadas usadas para el protocolo de identificación de sitios de muestreo, a) Clases ponderadas de pendiente del terreno, b) Clases ponderadas de orientación de laderas y c) Clases ponderadas de CVUS.

- Pt: pendiente del terreno
- Cob: cobertura vegetal y uso de suelo
- n: número de variables consideradas.

Validación de propuesta de muestreo

La validación del modelado se realizó a partir de un muestreo dendrocronológico en la porción sur de la RBMM dentro de los Ejidos Vare y San Pablo Malacatepec, ubicados en el municipio de Villa de Allende. El muestreo se realizó de manera aleatoria en dos sitios adyacentes dentro de las áreas aptas y no aptas que resultaron del análisis espacial de las variables biofísicas. El primer sitio de muestreo se realizó donde las áreas modeladas corresponden a clases aptas y muy aptas donde se cree que los árboles son sensibles a variables climáticas (Pendiente mayor a 20°, orientación de laderas al sur, sureste y suroeste, y cubiertas boscosas de oyamel y pino-encino). El segundo sitio se estableció en áreas no aptas, donde se cree los árboles son

complacientes (Pendiente menor a 20°, orientación de laderas norte, noreste y noroeste, y cubiertas boscosas de oyamel y pino-encino) (Fig. 3).

Dentro de los sitios muestreados (apto y no apto) se seleccionaron los árboles aleatoriamente considerando el diámetro de estos, para el sitio apto DAP>45cm y DAP>50cm para el sitio no apto. En el sitio apto se muestrearon 30 árboles de los cuales 16 de ellos fueron de *Pinus pseudostrobus* y 14 correspondieron a *Abies religiosa*, teniendo 78 núcleos de crecimiento (2 a 3 núcleos por árbol), mientras que para el sitio no apto, se muestrearon 63 árboles de los cuales 40 fueron de *Abies religiosa* y 23 de *Pinus pseudostrobus*, teniendo un total de de 135 núcleos de crecimiento.

Los núcleos de crecimiento se tomaron con una barrena de Pressler Haglof, las cuales se montaron en molduras de madera para facilitar su manejo. Posteriormente se pulieron con lijas de diferente número de granulometría (80 a 1200) para tener una mejor visibilidad de los anillos

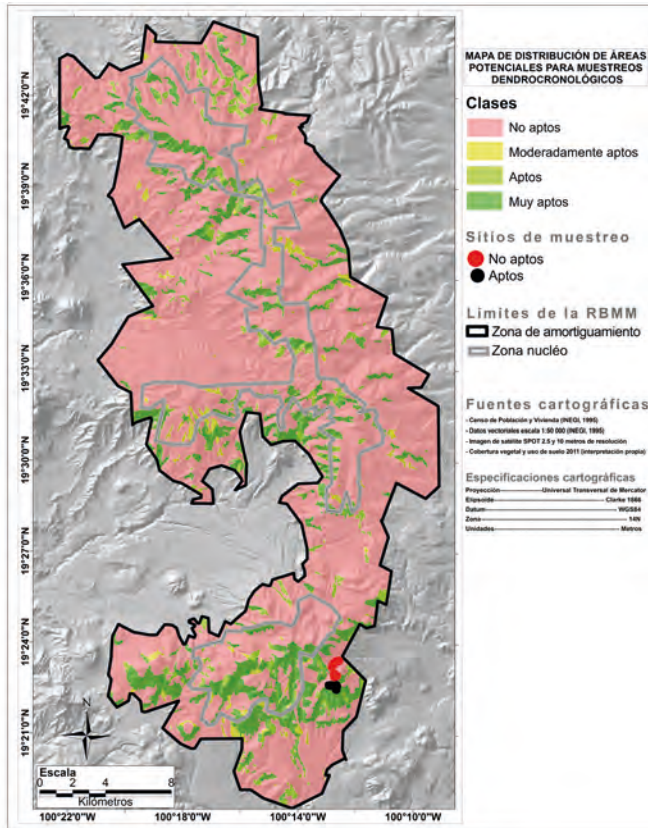


FIGURA 3. Mapa de distribución de los sitios potenciales de muestreo con fines dendrocronológicos.

de crecimiento. El fechado de las series de crecimiento se llevó a cabo a través de técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968). Una vez fechadas las muestras, cada crecimiento individual se midió con un equipo Velmex con una resolución de 0.001 mm. La calidad y medición del fechado se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001) y se construyeron cronologías de índices de ancho de anillo con la librería dplR (Dendrochronology Program Library in R) del programa estadístico R (Bunn, 2007).

Para determinar que el número de árboles de *Pinus pseudostrobus* o de *Abies religiosa* era independiente del sitio apto y no apto, y ver si existía influencia de la proporción de las especies se realizó una prueba de independencia de X^2 . Se construyó una cronología por sitio (índice de ancho de anillo), las cronologías fueron estandarizadas en índices con lo cual se eliminaron las tendencias de creci-

miento no relacionadas con la edad de los árboles. Posteriormente se compararon las cronologías para determinar las diferencias de crecimiento. Solo se tomaron en cuenta los árboles que presentaron una intercorrelación entre series >0.328 , $p < 0.01$ con el análisis del programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001), que sugiere un fechado exacto de los anillo de crecimiento. Además, se analizaron otros parámetros estadísticos como intercorrelación entre series, sensibilidad media, promedio de ancho de anillos y desviación estándar (estadísticos obtenidos con el programa COFECHA y la aplicación dplR) (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001; Bunn, 2007), así como la edad y diámetro de los árboles en cada sitio. Para el caso de los diámetros y edad de los árboles se evaluó si existían diferencias significativas entre el sitio apto y el no apto por medio de una prueba de t de Student.

RESULTADOS

Datos biofísicos del paisaje

Se determinó que las cubiertas y usos más importantes en la RBMM son: bosque de pino-encino cerrado (31%), bosque de oyamel cerrado (27%), agricultura de temporal (15%) y bosque abierto, principalmente, de pino-encino (13%). El porcentaje restante de la superficie (14%) alberga cubiertas no forestales y carentes de importancia para estudios dendrocronológicos tales como: pastizales, agricultura, arbustos, asentamientos humanos y cuerpos de agua. Los bosques cubren 71% de la RBMM, y se distribuyen en la mayor parte de esta. Las coberturas más importantes para llevar a cabo estudios dendrocronológicos son los bosques de oyamel, ubicados entre 2320 m y 3640 m snm, y los bosques de pino-encino de 2020 m a 3400 m snm.

El mapa de pendientes del terreno indicó que éstas varían de 0° a 66° . La superficie con pendientes más pronunciadas ($>20^\circ$) cubre 40% de la Reserva y se encuentra distribuida en toda el área (Fig. 2). Además, se encontró que existe una relación directa entre pendientes escarpadas y áreas boscosas mejor conservadas.

El mapa de orientación de laderas permitió estimar que 40% de la superficie de la Reserva se encuentra orien-



tada al sureste, suroeste o sur. Estas laderas se encuentran distribuidas a lo largo y ancho de la Reserva y reciben alta insolación. El resto de la superficie (60%), se encuentra orientada al norte, noreste o noroeste las cuales reciben menos insolación.

Ponderación y modelación de datos biofísicos

Las ponderaciones más altas (8-10) de cada una de las variables analizadas, permitieron ubicar las áreas consideradas que contienen árboles con variación interanual en el grosor de sus anillos, a consecuencia de variables limitantes como condiciones edáficas, topográficas y climáticas. La modelación e identificación de estas áreas mediante herramientas de SIG, señalan que 18% (108.53 ha) del área de estudio presenta pendientes pronunciadas (>20°); orientación de laderas sureste, suroeste y sur; y CVUS con bosque de oyamel y pino-encino (Fig. 2 y 3). Del 18% donde

se cree que existen árboles sensibles a variaciones climáticas, 11% se encuentra dentro de la zona núcleo de la Reserva, en un intervalo altitudinal de 2380 m a 3640 m snm (Fig. 2 y 3).

Validación de propuesta de muestreo para estudios dendrocronológicos

La validación de la eficiencia del protocolo de evaluación de las variables biofísicas, permitió identificar las diferencias existentes en edad y ancho de anillo entre los árboles del sitio apto comparados con el sitio no apto (Fig. 4).

La cantidad de árboles de *Pinus pseudostrabus* y *Abies religiosa* fue independiente del sitio de muestreo, es decir, ninguna de estas especies mostraron mayor o menor preferencia por alguna de las condiciones analizadas. Es por ello que, las diferencias en el ancho de anillos, se deben a diferencias entre sitios, y no a diferencias entre la

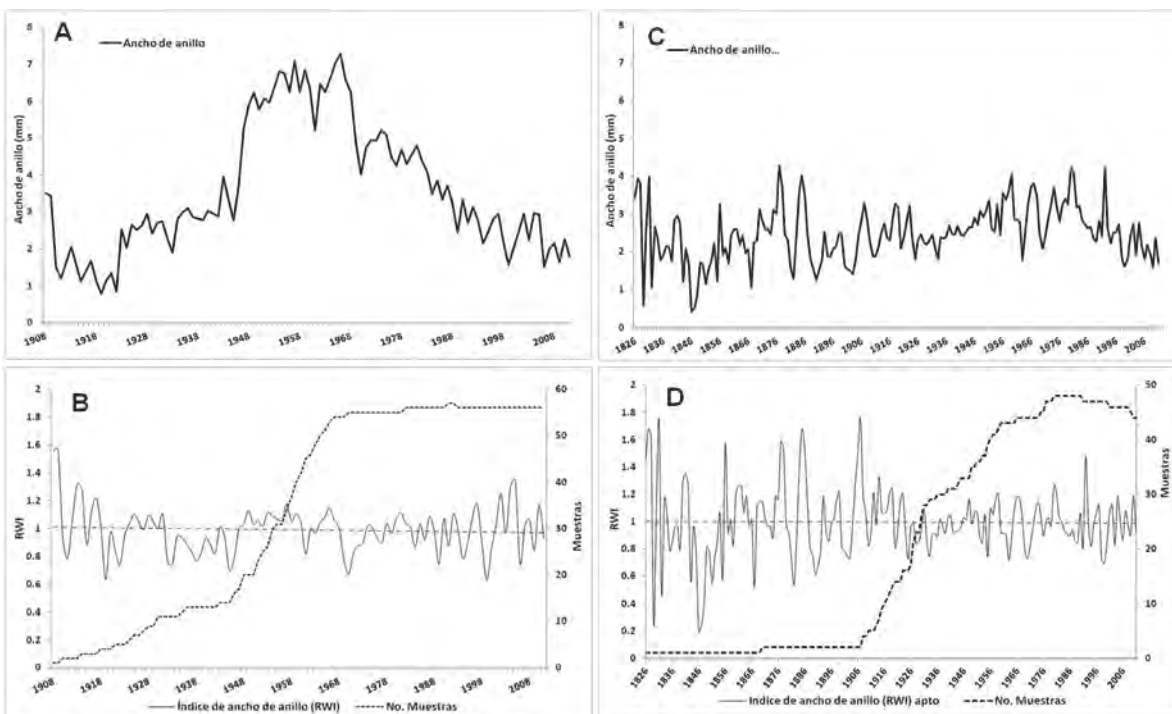


FIGURA 4. Caracterización de ancho de anillo del sitio apto y no apto: A) ancho de anillo para sitio no apto, B) ancho de anillo estandarizado para sitio no apto, C) ancho de anillo para sitio apto y D) ancho de anillo estandarizado para sitio apto. Las graficas B y D muestran variaciones en el ancho de la serie estandarizada como función a la desviación estándar, con lo cual está eliminando el ruido ocasionado por la tendencia biológica del crecimiento de los árboles. La línea con puntos continuos muestra el número de muestra que se incluyeron a lo largo de las series.

mayor o menor dominancia de estas especies. En el sitio apto, el árbol más longevo tiene un anillo interno que corresponde al año 1826, por lo cual, se generó una cronología de 185 años (1826-2011). Para el sitio no apto, el anillo interno del individuo más longevo fue de 1908, por lo tanto, se reconstruyó una cronología de 103 años (1908-2011).

En el sitio considerado apto, 26 de los 30 árboles muestreados presentaron una intercorrelación entre series >0.367 , mientras que para el sitio no apto, solo 40 de los 63 árboles muestreados presentaron una intercorrelación entre series >0.428 . Para los dos sitios, se presentaron valores de intercorrelación mayores al valor de referencia de 0.328 ($p < 0.01$) (Fig. 4 y Tabla 1).

Los resultados estadísticos de sensibilidad media, promedio del ancho de anillo, desviación estándar, y autocorrelación entre serie también muestran diferencias entre los árboles de los sitios (Tabla 1). Con relación al promedio del ancho de los anillos, se presentaron diferencias de casi el doble en el sitio no apto (4.08 mm) con respecto al apto (2.86 mm). El sitio apto presentó una mayor sensibilidad media (0.297), lo cual refleja una mayor sensibilidad del árbol a factores que limitan el crecimiento a nivel local. La desviación estándar promedio del ancho de anillo para el sitio no apto fue de 2.39 mm, mientras que el sitio apto, presentó una desviación estándar de 1.35 mm (Tabla 1). Los valores más altos de intercorrelación y sensibilidad media, a menudo, se asocian con un valor más bajo de autocorrelación. El valor de autocorrelación de la cronología estándar para el sitio apto fue de 0.609 la cual es menor al sitio no apto (0.832) (Tabla 1). Los análisis de la prueba de t-Student muestran que los árboles en el sitio apto tuvieron mayor edad ($t=2.87, p=0.006$) y menor diámetro ($t=2.57, p=0.006$).

DISCUSIÓN

Las técnicas de PR y herramientas de SIG con frecuencia son usadas en varios tipos de análisis, pero a pesar de su intenso uso, no encontramos antecedentes de análisis espaciales de variables derivadas de la topografía (pendiente del terreno, elevación e insolación de laderas) y de la distribución de la CVUS con el objetivo de ubicar árbo-

TABLA 1. Resultados estadísticos generados por el programa COFECHA para el sitio apto y no apto.

| | Sitio apto | Sitio no apto |
|--|------------|---------------|
| Intercorrelación entre series ¹ | 0.376 | 0.485 |
| Sensibilidad media ² | 0.297 | 0.257 |
| Promedio de ancho de anillos ³ | 2.86 | 4.08 |
| Desviación estándar de ancho de anillo ⁴ | 1.352 | 2.392 |
| Autocorrelación entre series de crecimiento ⁵ | 0.609 | 0.832 |
| Árbol más longevo encontrado (años) | 185 | 103 |

Es una medida de señal climática¹, variación relativa en el ancho de anillo de un año al siguiente², promedio de ancho de anillos de las series³, representa la desviación estándar de la serie de datos antes de estandarizar la cronología⁴, medida de correlación de anchura de anillos en un año n con el ancho de anillo $n-1$ ⁵.

les con variación en ancho de anillos y con diferencia en edades. En algunas partes del mundo, se han realizado trabajos donde se menciona que la topografía tiene efectos sobre el crecimiento radial y en la estructura de edades de los árboles (Oberhuber y Kofler, 2000; Bunn, 2005) En otros estudios, se indica, que también existe influencia de la topografía, humedad de suelo, orientación de laderas, temperatura y precipitación sobre el crecimiento de los árboles (Hairston y Grigal, 1991; Liang *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2006). En los estudios dendrocronológicos realizados en varias partes del mundo, y en particular en México, no se tienen registros del uso de análisis espaciales de variables biofísicas para elegir sitios de muestreo con potencial dendroclimático.

En el presente estudio, se analizaron tres variables (CVUS, pendiente del terreno y orientación de laderas) que se han identificado con mayor claridad, como indicadores que maximizan la señal climática que registran los árboles en su crecimiento (Fritts, 1976; Stokes y Smiley, 1968; Thomas, 2004; Speer, 2010). El análisis con estas tres variables para la RBMM, permitió encontrar árboles que presentan variación interanual en el ancho de los anillos debido a variaciones climáticas. Esto se demostró,



mediante las diferencias en longevidad (más de 50 años en el sitio apto) y crecimiento promedio de los árboles del sitio apto (2.86 mm), con respecto al sitio no apto (crecimiento promedio 4.08 mm). La incorporación de otras variables al modelo como profundidad y fertilidad de suelo, y capacidad de retención de humedad puede dar mejores resultados, ya que estas variables también influyen en el crecimiento de los árboles (Barij *et al.*, 2007). Sin embargo, resultaría difícil incorporar datos de dichas variables, ya que estos no existen de forma espacialmente explícita.

En el presente estudio los árboles con mayor edad, se encontraron en el sitio con pendiente escarpada y con alto grado de insolación dentro de bosques conservados, lo que concuerda con lo descrito por Bunn *et al.*, (2011) quienes encontraron que las condiciones topográficas de relieve y de la orientación de laderas influyen en el crecimiento de los árboles. Para los bosques de oyamel, se ha documentado que la elevación, la orientación de laderas y la pendiente del terreno afectan directamente su crecimiento (Socha, 2008). En este estudio, también se encontró una clara influencia de la pendiente del terreno y orientación de laderas sobre el diámetro y anchura de los anillos para las especies *Abies religiosa* y *Pinus pseudostrobus*.

En la ladera orientada al norte, noreste y noroeste encontramos mayor crecimiento (4.02 mm en promedio) y menor edad de los árboles (103 años), lo cual concuerda con otros estudios en latitudes mayores, donde tienen mayor crecimiento y menor edad en estas laderas, debido que las variaciones espaciales de la topografía, radiación solar y evapotranspiración influyen directamente sobre el crecimiento de los árboles. Esto se debe a que existe un mayor crecimiento de arboles en laderas que reciben menos insolación (Tajchman y Lacey, 1985; McNab, 1989; Speer *et al.*, 2004; Thomas, 2004; Somaru *et al.*, 2013).

Si bien en este estudio solo se comparó un sitio apto con uno adyacente no apto, el tamaño de muestra es superior a otros estudios donde han realizado reconstrucciones dendroclimáticas o documentando influencia de

variables climáticas en el crecimiento de los anillos de los árboles (Huante *et al.*, 1991; Bernal y Salazar, 2000; Díaz *et al.*, 2001; Cerano *et al.*, 2013).

La generación de un protocolo de muestreo dendrocronológico para el caso de México es relevante por la dificultad de ubicar áreas con árboles sensibles a variaciones climáticas. Esto debido a que se tiene grandes contrastes en tipos de CVUS, condiciones fisiográficas y topográficas. El uso de técnicas de PR y herramientas de análisis espacial como los SIG en la identificación de sitios para muestreo dendrocronológico en la RBMM, permitió ubicar áreas donde más de 80% de los árboles muestreados presentan buena intercorrelación entre series (26 de 30 árboles en el sitio apto), situación que indica que los árboles están respondiendo a factores climáticos comunes, lo que permite asignar fechas calendáricas a cada crecimiento. En otros estudios realizados en México, donde los muestreos se realizaron con base a la experiencia de los investigadores, se han tenido que eliminar hasta 40% de las muestras debido a que no presentan una intercorrelación >0.328 , debido a problemas de crecimiento (Cerano *et al.*, 2013). Por otro lado, cuando no se tiene experiencia y conocimiento del área a estudiar es difícil ubicar los sitios más idóneos con presencia de árboles sensibles y con alto potencial dendrocronológico.

CONCLUSIONES

Este estudio, refuerza el planteamiento de que las características topográficas (pendiente de terreno y orientación de laderas) son factores determinantes en el crecimiento de los árboles y que se manifiestan en un limitado incremento radial y presencia de árboles más longevos.

El análisis espacial de variables biofísicas del paisaje utilizando técnicas de PR y herramientas de SIG, permitió definir sitios con adecuado potencial para estudios dendrocronológicos. Esta metodología ha sido poco utilizada con estos fines; sin embargo, son herramientas que presentan un alto potencial para este tipo de estudios.

El análisis espacial de las variables biofísicas para la RBMM realizado en el presente estudio, permitió ubicar sitios de muestreo con árboles longevos, que mostraron

alta variación interanual en el ancho de los anillos, lo cual puede ser de utilidad para el desarrollo de reconstrucciones dendroclimáticas.

En consecuencia, para este tipo de estudios se recomienda la integración de una plataforma de SIG, cuyos resultados apoyen a la selección *a priori* de sitios de muestreo. De esta forma se puede minimizar el tiempo, esfuerzo de muestreo y recursos económicos a emplear en la generación de series dendrocronológicas, que a la vez tengan mayor sensibilidad climática. Por lo que un protocolo de identificación de sitios de muestreo similar al planteado en el presente estudio, puede ser utilizado y replicable en otras áreas, ya que los insumos y las herramientas utilizadas son de fácil acceso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los proyectos SEP-CONACYT (clave 2010-154434) y CONACYT-Ciencia Básica (clave 179386) por el apoyo otorgado. El primer autor agradece al CONACYT por la beca otorgada para la realización de sus estudios de Doctorado en Geografía de la UNAM.

REFERENCIAS

- Barij, N., A. Stokes, T. Bogaard y B. van Beek. 2007. Does growing on a slope affect tree xylem structure and water relations?. *Tree Physiology* 27(5):757-764.
- Bernal-Salazar, S. y T. Terrazas S. 2000. Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques* 6(1):73-86.
- Bonham-Carter, G.F. 1994. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS. 1ª ed. Pergamon Press. Nueva York. 398 p.
- Bradley, R.S. 1999. Paleoclimatology: Reconstructing climates of the quaternary. 1ª ed. Academic Press. San Diego, CA. 631 p.
- Bravo, E.M., M. Mendoza, T. Carlón, L. Medina, T. Sáenz y R. Páez. 2012. Effects of converting forest to avocado orchards on topsoil properties in the Trans-mexican Volcanic System, Mexico. *Land Degradation & Development* 25(5):452-467.
- Brower, L.P., G. Castilleja, A. Peralta, J. López, L. Bojórquez, S. Díaz, D. Melgarejo y M. Missrie. 2002. Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the monarch butterfly in Mexico, 1971–1999. *Conservation Biology* 16(2):346–359.
- Bunn, A.G., L. Waggoner y L.J. Graumlich. 2005. Topographic mediation of growth in high elevation foxtail pine (*Pinus balfouriana* Grev. et Balf.) forests in Sierra Nevada, USA. *Global Ecology Biogeography* 14(2):103-114.
- Bunn, A.G. 2007. Dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2):115-124.
- Bunn, A.G., M.K. Hughes y M. Salzer. 2011. Topographically modified tree-ring chronologies as a potential means to improve paleoclimate inference. *Climatic Change* 105(3-4):627-634.
- Cerano P.J., J. Villanueva, M. Cervantes, L. Vázquez, C. Trucios y D. Guerra. 2013. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 83:41-54
- Chuvieco, S.E. 2008. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. 3ª Ed. Ariel. Barcelona, España. 597 p.
- (DOF) Diario Oficial de la Federación. 2000. Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de Reserva de la Biosfera, la región denominada Mariposa Monarca, ubicada en los municipios de Temascalcingo, San Felipe del Progreso, Donato Guerra y Villa de Allende en el Estado de México, así como en los municipios de Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitácuaro y Aporo en el Estado de Michoacán, con una superficie total de 56,259-05-07.275 hectáreas, Primera sección. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. p:5-28.
- Díaz, S.C., R. Touchan y T.W. Swetnam. 2001. A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, Mexico. *International Journal of Climatology* 21(8):1007–1019.
- Fekedulegn, D., R. Hicks y J.J. Colbert. 2003. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian



- watershed. *Forest Ecology and Management* 177(1-3):409-425.
- Fritts, H.C. 1976. Tree rings and climate. 2ª ed. Academic Press. Londres-Nueva York. 567 p.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, UNAM. México. 246 p.
- Guimet, P.J. 1992. Introducción conceptual a los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estudio Gráfico Madrid, España. 139 p.
- Giménez, A.J., I. Ramírez y M. Pinto. 2003. Las comunidades vegetales de la Sierra de Angangueo (Estados de Michoacán y México, México): clasificación, composición y distribución. *Lazaroa* 24:87-111.
- Grissino-Mayer, H.D. 2001. Evaluating crossdating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57(2):205-221.
- Hairston, A.B. y D. Grigal. 1991. Topographic influences on soils and trees within single mapping units on a sandy outwash landscape. *Forest Ecology and Management* 43(1-2):35-45.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43:69-78.
- Huante, P., E. Rincón y T.W. Swetnam. 1991. Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacán, México. *Tree-Ring Bulletin* 51:15-27.
- Hughes, M.K. 2011. Dendroclimatology in High-Resolution Paleoclimatology. In: M.K. Hughes, T.W. Swetnam y H.F. Diaz, eds. Dendroclimatology, developments in paleoenvironmental research. Springer. Países Bajos. p:17-34.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).1982. Carta Edafológica, 1:50000, Ciudad Hidalgo E14-A-25, SPP, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).1995. Conjunto de datos vectoriales escala 1:50,000.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley, eds. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA, 1535 p.
- Jáuregui, E. 2004. La variabilidad climática en los registros instrumentales de México, In: J. Martínez y A. F. Fernández, eds. Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F. p:277-287.
- Liang, E., X.M. Shao, D. Eckstein, L. Huang y X.H. Liu. 2006. Topography and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau. *Forest Ecology and Management* 236(2-3):268-277.
- Makinen, H., P. Nöjd, K.P. Kahle, U. Neumann, B. Tveite, K. Mielikainen, H. Rohle y H. Spiecker. 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management* 171(3):243-259.
- Mann, M.E., R.S. Bradley y M.K. Hughes. 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392:778-787.
- McNab, W.H. 1989. Terrain shape index: quantifying effect of minor landforms on tree height. *Forest Science* 35(1):91-104.
- Mendoza, M.E., E. López, D. Genelett, D. Pérez-Salicrup y V. Salinas. 2011. Analyzing land cover and land use change processes at watershed level: A multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975-2003). *Applied Geography* 31(1):237-250.
- NAMCP (North American Monarch Conservation Plan). 2008. Commission for Environmental Cooperation, Canada. 393, rue St-Jacques Ouest, bureau 200 Montreal Canada. 56 p.
- Oberhuber, W. y W. Kofler. 2000. Topographic influences on radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at small spatial scales. *Plant Ecology* 146(2):231-240.
- Sample, V.A. 2004. Remote sensing and GIS in ecosystem management. American Forests and Forest Policy Center. Estados Unidos de América. 382 p.

- Somaru, R y H.P. Borgaonkar. 2014. Tree-ring analysis over western Himalaya and its long-term association with vapor pressure and potential evapotranspiration. *Dendrochronologia* 32(1):32-38.
- Socha, J. 2008. Effect of topography and geology on the site index of *Picea abies* in the West Carpathian, Poland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23(3):203-213.
- Speer, J.H., K.H. Orvis, H.D. Grissino-Mayer, L.M Kennedy y S.P. Horn. 2004. Assessing the dendrochronological potential of *Pinus occidentalis* Swartz in the Cordillera Central of the Dominican Republic. *The Holocene* 14(4):563-569.
- Speer, J. 2010. Fundamentals of tree-ring research. The University of Arizona Press, Tucson. 333 p.
- Stokes, M y T. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. The University of Arizona Press, Tucson. 73 p.
- Tajchman, S.J y C.J Lacey. 1985. Bioclimatic factors in forest site potential. *Forest Ecology and Management* 14(3):211-218.
- Thomas, P.A. 2004. Trees: Their Natural History. Cambridge University Press. 298 p.
- Trenberth, K.E y B.L. Otto-Bliesner. 2003. Toward integrated reconstruction of past climates. *Science* 300(5619):589-591.
- Vaganov, E.A., M.K. Hughes y A.V. Shashkin. 2006. Growth dynamics of conifer tree rings: Images of past and future environments. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Alemania. 354 p.
- Villanueva-Díaz, J., J. Cerano, V. Constante, P.Z. Fulé, y E. Cornejo. 2009. Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques* 15(3):45-64.
- Yang, Y., M. Watanabe, F. Li, J. Zhang, W. Zhang y J. Zhai. 2006. Factors affecting forest growth and possible effects of climate change in the Taihang Mountains, northern China. *Forestry* 79(1):135-147.

Manuscrito recibido el 25 de abril de 2014.
Aceptado el 23 de febrero de 2015.

Este documento se debe citar como:
Carlón Allende, T., M. E. Mendoza, J. Villanueva Díaz, D. R. Perez Salicrup. 2015. Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Madera y Bosques* 21(2):11-22.