

MODELADO BIOCLIMÁTICO COMO HERRAMIENTA PARA EL MANEJO FORESTAL: ESTUDIO DE CUATRO ESPECIES DE *Pinus*

Oswaldo Téllez Valdés¹, Yolanda M. Chávez Huerta²,
Alberto Gómez-Tagle Chávez³ y Marcela V. Gutiérrez Garduño⁴

RESUMEN

En este estudio se incorpora información florística actualizada y un método de modelado bioclimático (BIOCLIM) para evaluar 19 parámetros climáticos y generar los patrones de distribución potencial de cuatro especies de *Pinus* de valor económico en México. Los modelos obtenidos reflejan la ubicación de los taxa como han sido registrados en la literatura. Sin embargo, la extensión de su disposición territorial puede estar en ocasiones sobrestimada. Los resultados destacan la importancia de tener datos climáticos con resolución espacial alta (1 km²), así como de conocer las características biológicas de las especies localizadas con precisión mediante coordenadas y altitud, ya que permiten establecer una correlación con aquellas variables que son relevantes para explicar las limitantes relacionadas con la distribución y productividad de especies vegetales de interés comercial. Se discuten las aplicaciones que este tipo de resultados pueda tener para definir el uso potencial de los bosques, el establecimiento de plantaciones forestales y la identificación de las variables climáticas asociadas con la ubicación geográfica de las especies y con una mejor producción de madera. Se concluye que el conocimiento preciso de los parámetros de clima que determinan la respuesta de las plantas, adquiere trascendencia para el diseño de estrategias, tanto para las de manejo y aprovechamiento de especies económicamente importantes, como para la conservación de los recursos naturales.

Fecha de recepción: 21 de agosto de 2003.

Fecha de aceptación: 29 de julio de 2005.

¹ Unidad de Biología, Tecnología y Prototipos (UBIPRO), Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM: Correo-e: tellez@servidor.unam.mx

² Campo Experimental Morelia, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, INIFAP.

³ Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

⁴ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF), INIFAP.

Palabras clave: Distribución, modelos, parámetros climáticos, perfiles bioclimáticos, pinos, reforestación.

ABSTRACT

A bioclimatic modelling approach (BIOCLIM) along with updated floristic information, is used to assess 19 climatic parameters and generate models of potential distribution of four economically relevant species of *Pinus* (Pinaceae) in Mexico. Models of potential distribution reflect the current distribution found in the literature; however, potential distribution can be sometimes overestimated. The results bring up the relevance of high resolution (1 km²) climatic surfaces as well as biological data precisely geocoded (latitude, longitude and elevation). These data sets support the establishment of a correlation between climatic and biological variables, that allow the understanding of the limiting factors which are related to the distribution and productivity of plants. The application of this type of results related to the spatial distribution of potential forest landuse, plantation establishment and climatic controls associated to species distribution and better timber production is discussed. Precise knowledge of climatic variables or parameters, which determine the biologic response, is relevant to management strategies designed for economically relevant species, as well as natural resources preservation.

Key words: Distribution, models, bioclimatic profiles, climatic parameters, pines, reforestation.

INTRODUCCIÓN

La extensión territorial de México es de alrededor de 195.8 millones de ha, de las cuales 73.3% (143.6 millones de ha) tiene vocación forestal; en la actualidad sólo 19.9% está arbolada, y de ellas 14.1% corresponden a bosque mixto de coníferas y latifoliadas (Villarreal *et al.*, 1993). No obstante que es el país con mayor riqueza de especies del género *Pinus* en el mundo (Farjon *et al.*, 1997), poco se sabe acerca de sus 47 taxa (40% del total mundial) como recursos forestales. Paradójicamente, 80% de los productos a escala nacional, entre las que destacan la madera, resina, papel, los recursos escénicos, servicios ambientales y recreativos, proceden de los bosques en donde los pinos son dominantes (Eguiluz, 1977; Farjon *et al.*, 1997).

Diversos autores concuerdan en que las variables climáticas y topográficas determinan en gran medida la distribución del género *Pinus* en el territorio nacional (Martínez, 1953; SAG y FAO, 1962; Perry, 1991). De las 32 entidades de la República, sólo en Campeche, Tabasco y Yucatán, no existen registros de *Pinus*, mientras que en los estados restantes, el número varía de una especie en

Quintana Roo, hasta 18 en Jalisco (Farjon y Styles, 1997). Su distribución ocurre entre 15°00' y 32°05' de latitud norte, 89°00' y 118°10' de longitud oeste, a una altitud que varía de 50 a 4000 m de altitud (Eguiluz, 1982; Farjon y Styles, 1997; Farjon, Pérez de la Rosa y Styles, 1997).

Los recursos forestales proporcionan múltiples satisfactores al hombre; sin embargo, han sido concebidos como fuentes inagotables, de manera que al disminuir o agotarse en una región, las comunidades humanas cambian de lugar, lo que favorece el proceso de explotación en otro sitio, lo cual ha sido una de las causas principales del deterioro vigente en los ecosistemas (Villarreal *et al.*, 1993). Una de las medidas que se han adoptado para contrarrestarlo o revertirlo es la reforestación. Sin embargo, no existen datos acerca de los requerimientos ambientales de las especies potencialmente importantes para ser usadas con este fin, salvo algunas excepciones.

Al respecto, Eguiluz (1977) ha descrito la relación entre la altitud y la distribución de las especies de pinos. El mismo investigador (1982) asoció la presencia de estas coníferas con las latitudes y longitudes mínimas y máximas, así como con algunos factores ambientales, como el tipo de clima, el gradiente térmico, las temperaturas mínima y máxima y la precipitación. En la última década del siglo XX algunos autores han discutido acerca de la utilidad de determinadas variables climáticas, en especial los promedios mensuales, porque permiten definir la ubicación geográfica potencial de una planta, bajo el argumento de que los valores extremos asociados, por ejemplo las heladas o las sequías, tienen mayor importancia ya que limitan la funcionalidad fisiológica de la especie y, por ende, su distribución geográfica (Lindenmayer *et al.*, 1994).

Para los taxos considerados en este estudio existen datos relativos a sus preferencias climáticas. Por ejemplo, Sánchez y Huguet (1959 citados en SAG-FAO, 1962), Vázquez *et al.* (1962), Verduzco *et al.* (1962) y Perry (1991) señalan que *Pinus arizonica* Engelm. ha sido registrada en sitios con una temperatura promedio anual entre 10 y 17°C, máxima absoluta de 38°C y mínima absoluta de -18°C, con una precipitación inferior a 1000 mm, (508 - 890 mm al año). Por otra parte, se ha documentado a *Pinus durangensis* Martínez en lugares con una temperatura promedio anual que oscila de 13 y 15°C, tolerante a las heladas, una precipitación que varía de 800 - 1200 mm al año. En el caso de *Pinus devoniana* Lindl., los autores previos y Loock (1950, en SAG-FAO, 1962) la ubican en áreas con una precipitación superior a 890 mm, pero con mayor frecuencia entre 1000 y 1700 mm por año, una temperatura promedio anual de 16 a 21°C; mientras que *Pinus pseudostrabus* Lindley, habita en sitios con 15 y 16°C de temperatura promedio anual, una precipitación de 890 - 1600 mm por año, en sitios con lloviznas y neblinas en invierno; además tolera heladas suaves.

Las especies de pino de uso maderable con mayor valor económico en México son: *Pinus engelmannii* Carr., *P. montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite* Ehrenberg et Schldl., *P. durangensis* y *P. arizonica*. Por mayor frecuencia e importancia de su aprovechamiento y uso global, se pueden citar a: *Pinus arizonica*, *P. durangensis*, *P. pseudostrobus*, *P. patula* Schiede ex Schldl. et Cham., *P. montezumae*, *P. teocote* Schiede ex Schldl. et Cham. y *P. maximinoi* H. E. Moore (SFF, 1994).

Farjon y Styles (1997), quienes hacen una revisión detallada de los pinos mexicanos, señalan que los más sobresalientes desde el punto de vista productivo son: *Pinus patula*, *P. oocarpa* Schiede ex Schldl., *P. pseudostrobus*, *P. herrerae* Martínez, *P. leiophylla* Schiede & Deppe y *P. arizonica*. Como ejemplo, señalan que durante 1986 se produjeron 7.5 millones de metros cúbicos de madera de diversas especies.

De acuerdo con lo anterior, el presente estudio pretende cumplir con los siguientes objetivos: (1) usar la información taxonómica y fitogeográfica actual disponible de cuatro especies de *Pinus* y 19 diferentes parámetros bioclimáticos, para generar perfiles cualitativos de este tipo y los modelos de distribución potencial de especies económicamente relevantes y (2) discutir algunas aplicaciones en donde los resultados obtenidos pueden ser útiles, en particular en el desarrollo de estrategias para el manejo forestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las cuatro especies seleccionadas fueron: *Pinus arizonica*, *P. devoniana*, *P. durangensis* y *P. pseudostrobus*, lo que obedece a que ellas destacan entre las más cotizadas para la producción de madera, resina y pulpa para la fabricación de papel; para efectos de reforestación y el establecimiento de plantaciones forestales con diferentes fines constituyen opciones interesantes.

La información relacionada con su distribución geográfica fue tomada de las bases de datos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y de la Red Mexicana de Información Biótica (REMIB) de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Los registros de las cuatro especies con sus localidades georreferenciadas se tomaron de dichas fuentes. Entre 33 y 124 de ellos por taxón fueron usados para elaborar los modelos; en forma general, cubren tanto el intervalo geográfico de los taxa, como el altitudinal conocido. Los nombres científicos y los descriptores corresponden a la nomenclatura de Farjon *et al.* (1997).

El método bioclimático empleado es el del programa ANUCLIM (Houlder *et al.*, 2000), que se basa en superficies climáticas (en formato *raster*) interpoladas matemática y estadísticamente a partir de datos registrados en una red de

estaciones meteorológicas estándar. Los archivos digitales se generaron mediante el método "thin plate smoothing spline" del paquete ANUSPLIN (Hutchinson 1991, 1995a, 1995b, 1997, 1998; Hutchinson y Gessler, 1994). Esas superficies consideran valores mensuales promedio de precipitación y temperatura para periodos mayores de 15 años en más de 6200 estaciones meteorológicas, de las cuales 4000 incluyen los de temperatura y 6218 los de precipitación, todas del mismo conjunto de estaciones. Los errores promedio estimados para las áreas variaron de 8 a 13% para los valores mensuales de precipitación y alrededor de 0.4 y 0.5°C para los de temperatura, semejantes a los presentes en los instrumentos meteorológicos estándar.

BIOCLIM asocia los registros conocidos con sus coordenadas a las coberturas climáticas referidas, con lo que se genera un perfil con base en la acumulación de frecuencias de los valores de las celdas en que éstos ocurren, para cada uno de los 19 parámetros considerados (Cuadro 1) y son el fundamento para generar los perfiles bioclimáticos usados para elaborar los modelos de distribución potencial de las especies involucradas.

Se diseñó un perfil bioclimático para cada taxón seleccionado y por medio del principio de homoclima, se generaron los modelos, con el fin de definir sitios con climas semejantes. El método fue usado para identificar aquellos puntos en los archivos *raster*, en donde las condiciones climáticas fueran las que estuvieran dentro de los límites de los perfiles bioclimáticos de las especies (Booth *et al.*, 1987). Esta búsqueda homoclimática se condujo a todos los niveles posibles, por lo que se utilizaron cinco rangos porcentuales del perfil bioclimático: valores extremos mínimos y máximos (entre 0 y 100%) y menos extremos en el mismo (de 2.5 - 97.5%, 5 - 95%, 10 - 90% y de 25 a 75%). Lo anterior significa una reducción de los registros extremos hacia los más propicios para el establecimiento y desarrollo de los individuos y poblaciones; normalmente uno de tales intervalos coincide con el grueso de los datos usados para generar el modelo, que es interpretado como el intervalo "preferido" de la especie bajo análisis, aunque en los otros rangos pueda estar presente la especie.

La frecuencia acumulada de los puntos de distribución para cada parámetro bioclimático fue graficada e inspeccionada para detectar valores significativamente fuera de lo normal.

Los errores de georreferenciación se identificaron con el programa ArcView 3.2 y una evaluación más detallada de anomalías y errores potenciales en los perfiles bioclimáticos se hizo con el programa BIOCLIM (Houlder *et al.*, 2000). Cuando fue posible, dichas imprecisiones fueron corregidas con ayuda de las cartas de INEGI escala 1:50,000; algunos registros anómalos tuvieron que ser omitidos.

Las áreas de distribución susceptibles de ser ocupadas por las cuatro

Cuadro 1. Parámetros utilizados en el modelado bioclimático (BIOCLIM).

No.	Parámetros
1	Temperatura promedio anual
2	Oscilación diurna de la temperatura
3	Isotermalidad
4	Estacionalidad de la temperatura
5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido
6	Temperatura mínima promedio del periodo más frío
7	Oscilación anual de la temperatura
8	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso
9	Temperatura promedio del trimestre más seco
10	Temperatura promedio del trimestre más cálido
11	Temperatura promedio del trimestre más frío
12	Precipitación anual
13	Precipitación del periodo más lluvioso
14	Precipitación del periodo más seco
15	Estacionalidad de la precipitación
16	Precipitación del trimestre más lluvioso
17	Precipitación del trimestre más seco
18	Precipitación del trimestre más cálido
19	Precipitación del trimestre más frío

especies fueron mapeadas (figuras 1 a 4) y para cada uno de los taxa se produjo un archivo en formato ARCINFO ASCII GRID, con ayuda del programa BIOMAP del paquete ANUCLIM y el Modelo Digital de Elevación (MDE). La cartografía digital a la resolución deseada se generó con el modelo digital de elevación con 30 segundos (0.0083° o aproximadamente 1 km^2) de resolución espacial. La superficie cubierta por los ambientes climáticos adecuados en donde actualmente prosperan las especies y la distribución potencial por taxón fue calculado con ayuda del programa ArcView 3.2 (ESRI, 2000).

RESULTADOS

Se obtuvieron los valores climáticos para cada uno de los 19 parámetros bioclimáticos del perfil por especie (cuadros 2, 3, 4 y 5); se presentan los diferentes intervalos en los que fue fraccionado y que facilitan la explicación de las distintas posibilidades de predicción del modelo, ya que están relacionados con su representación gráfica en la cartografía digital, lo que permite mostrar de manera gráfica los lugares en donde estas condiciones ambientales ocurren.

Las áreas de distribución conocida de las especies consideradas en este estudio, coinciden con los modelos de distribución potencial generados (figuras 1 a 4).

En el caso de *Pinus arizonica* (Cuadro 2), se cuenta con registros documentados a través de la Sierra Madre Occidental, Chihuahua y el sur de Durango; además de colectas dispersas en Coahuila, Zacatecas, sur de Nuevo León y occidente de Tamaulipas. Una parte importante del modelo de distribución potencial obtenido coincide con todas aquellas áreas en donde existen datos de ubicación actual (Figura 1). Sin embargo, la superficie se extiende a porciones menos montañosas o bajas dentro del Altiplano Mexicano, en Coahuila y Chihuahua hasta muy al sur, en Aguascalientes, San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato e incluso Hidalgo, zonas en las que básicamente se tienen los valores mínimos y/o máximos del perfil bioclimático de la especie.

P. devoniana está presente en una amplia extensión de México, cuenta con numerosos registros botánicos en el occidente del país, en estados como Durango, Nayarit, Jalisco, Michoacán y Guerrero. En el oriente, se ha recolectado en Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo, Veracruz y Puebla, así como en el centro en Zacatecas, Aguascalientes y Guanajuato; hacia el sur del país en el Estado de México, Distrito Federal, Tlaxcala y Morelos, penetrando en Oaxaca y Chiapas, e incluso hasta Guatemala. El modelo obtenido coincide con casi todas las localidades en las se ha consignado *P. devoniana* (Figura 2 y Cuadro 3).

Cuadro 2. Valores de los componentes del perfil bioclimático para la especie *Pinus arizonica*.

Parámetros bioclimáticos	Intervalos				
	Mínimo - máximo	2.5-97.5%	5-95%	10-90%	25-75%
1	8.7-18.8(12.5±2.84)	9.1-18.7	9.4-18.4	9.8-17.8	10.5-13.7
2	13.3-19.5(17±1.32)	14.1-19.5	14.5-18.7	15.2-18.4	16-18
3	0.47-0.73(0.57±0.05)	0.48-0.73	0.49-0.67	0.50-0.64	0.54-0.61
4	0.81-2.27(1.52±0.33)	0.89-2.27	0.96-2.12	1.13-2.01	1.30-1.77
5	22.7-34.2(27.3±2.86)	23.1-34.1	23.5-33.7	24.1-31.9	25.2-29.6
6	-5.9-4.4(-2.4±2.97)	-5.7-4.4	-5.6-4.2	-5.3-3.5	-4.6-0.5
7	23.3-36.1(29.7±3.04)	24-36.1	24.6-35.4	26.1-34.2	27.3-31.9
8	12.6-24(17.4±2.85)	13.5-23.9	13.9-23.5	14.4-22.6	15.4-18.8
9	7.6-14.9(10.9±1.83)	8.2-14.9	8.6-14.7	9.1-14.3	9.5-11.7
10	12.8-25.2(17.8±3.1)	13.8-25.2	14.2-24.8	14.6-23.5	15.6-19.3
11	3.10-14(7±2.74)	3.3-13.5	3.6-12.7	4.2-12.1	5.4-8.5
12	280-1236(741±235)	328-1236	375-1188	433-1076	555-917
13	13-74(45±16.75)	16-74	19-73	21-69	28-57
14	0	0	0	0	0
15	51-118(87±14.76)	53-118	56-114	72-108	78-99
16	152-728(437±154)	169-719	186-690	216-642	296-562
17	0-69(44±15.76)	3-69	5-67	30-63	38-54
18	122-697(395±152)	140-688	157-659	186-601	252-513
19	28-200(100±47)	31-197	34-189	39-176	62-139

Cuadro 3. Valores de los componentes del perfil bioclimático para la especie *Pinus devoniana*.

Parámetros bioclimáticos	Intervalos				
	Mínimo - máximo	2.5-97.5%	5-95%	10-90%	25-75%
1	9.7-23.8(18.2±3.4)	10.9-23.8	12.8-23.6	13.6-23.2	16.9-20.5
2	10.2-18.1(13.9±1.81)	10.8-18.1	11.5-18.1	12-17	12.7-15
3	0.60-0.73(0.66±0.04)	0.60-0.73	0.61-0.73	0.61-0.72	0.63-0.70
4	0.30-1.21(0.62±0.21)	0.37-1.21	0.39-1.21	0.41-1.01	0.45-0.77
5	22.1-37.4(28.8±3.82)	22.5-37.4	22.9-36.4	23.8-34.2	26.1-32.1
6	-4.9-15.2(7.6±4.11)	-3.2-15.2	1.8-15.2	3.3-14.2	5-10.7
7	15.5-29.4(21.2±3.33)	15.9-29.4	16.3-29.4	18.4-26.4	19.1-23.6
8	13.3-25.1(19.3±3.15)	13.8-25.1	14.3-25.1	14.9-23.7	17-22
9	8.5-24.3(17.5±3.97)	9.8-24.3	11.2-24.1	12.4-23.7	14.6-20
10	13.9-26.3(20.4±3.4)	14.5-26.3	15-26.1	15.7-25.6	17.9-23.2
11	5.5-22.2(15.8±3.67)	6.9-22.2	10-21.9	11.3-21.2	14-18.3
12	400-2071(1058±315.01)	542-2071	596-2071	667-1379	880-1294
13	19-85(58±15.33)	25-85	28-83	40-77	50-69
14	0	0	0	0	0
15	64-116(96±12.62)	69-116	73-116	77-114	91-107
16	198-937(614±171.42)	261-937	298-937	361-828	516-746
17	0-168(28±33.01)	1-168	2-168	4-61	11-44
18	140-695(310±117.04)	152-695	164-656	187-466	237-383
19	17-249(56±48.12)	18-249	20-233	23-124	32-61

Cuadro 4. Valores de los componentes del perfil bioclimático para la especie *Pinus durangensis*.

Parámetros bioclimáticos	Intervalos				
	Minimo - máximo	2.5-97.5%	5-95%	10-90%	25-75%
1	8.8-22.8(12.9±3.42)	9-22.8	9.1-22.3	9.4-18.1	10.3-15.5
2	13.8-18.4(16.8±1.25)	14-18.4	14.4-18.3	15-18.2	16-17.8
3	0.52-0.66(0.60±0.04)	0.52-0.66	0.52-0.66	0.53-0.65	0.59-0.63
4	0.68-1.96(1.32±0.31)	0.81-1.96	0.84-1.94	0.90-1.81	1.17-1.46
5	22.5-37.4(26.7±3.34)	22.7-37.2	22.8-35.4	23.1-31.1	24.1-28.6
6	-6.1-10.9(-1.4±4.21)	-5.9-10.6	-5.8-8.9	-5.5-5.5	-4.5-1.4
7	21.9-33.8(28.1±3.09)	22.4-33.8	22.8-33.4	23.6-32.7	25.9-30.6
8	13-24.9(17±2.69)	13.3-24.9	13.6-24.4	14.2-21.7	15.2-18.5
9	7.3-23.6(12.1±3.76)	7.6-23.5	7.8-22.5	8.4-17.6	9.4-14.3
10	13.2-26.3(17.4±2.93)	13.4-26.1	13.7-24.5	14.1-22.6	15.4-18.9
11	3.5-18.6(8.1±3.9)	3.8-18.6	4-18.1	4.5-15	5.5-10.7
12	412-1270(933±251.8)	463-1269	508-1259	575-1239	750-1177
13	20-76(57±14.35)	23-76	33-75	39-74	49-70
14	0	0	0	0	0
15	79-115(92±10.01)	79-115	80-111	81-107	85-101
16	204-748(562±143.35)	236-748	323-746	375-733	459-695
17	0-66(41±20.71)	1-66	2-65	4-63	31-57
18	149-708(481±160.13)	182-708	212-705	255-689	359-638
19	29-242(134±58.76)	34-241	39-235	49-223	90-176

Cuadro 5: Valores de los componentes del perfil bioclimático para la especie *Pinus pseudostrobus*.

Parámetros bioclimáticos	Intervalos				
	Mínimo - máximo	2.5-97.5%	5-95%	10-90%	25-75%
1	6-23.3(15.8±3.33)	9.8-22.7	10.7-21.8	11.7-20.3	13.5-18.3
2	8.1-19.8(13.7±2.35)	8.8-19.2	10-17.9	10.8-16.8	12-15.5
3	0.51-0.76(0.65±0.05)	0.56-0.76	0.57-0.73	0.59-0.72	0.62-0.68
4	0.25-1.84(0.65±0.23)	0.31-1.44	0.37-1.04	0.43-0.96	0.51-0.71
5	11.7-33.8(26.1±4.08)	18.8-33.6	20.2-33.1	21.1-32	23-29.6
6	-4.1-13.9(5.1±3.4)	-0.2-13.5	0.60-12.6	1.5-10	2.5-7.2
7	11.8-31.4(21±3.34)	15.7-28.8	16.1-27.1	17-25.4	18.6-23.4
8	6.1-24.2(16.9±3.51)	10.7-23.8	11.8-23.1	12.4-22	14.4-19.7
9	5-23.3(14.1±3.49)	8.8-22.9	9.2-21.7	10-18.5	11.4-16.6
10	7.1-25.4(17.9±3.55)	11.4-25	12.7-24.4	13.4-23.2	15.5-20.5
11	4.3-21.5(13.2±3.21)	7-20.9	8.7-20	9.8-17.5	11.2-15.1
12	400-2279(1070±369.69)	483-2084	566-1890	634-1608	793-1270
13	19-105(55±17.95)	23-94	27-87	31-80	44-68
14	0-12(0±2.22)	0-11	0-1	0-1	0-1
15	50-108(87±12.59)	63-107	65-106	70-103	77-98
16	198-1207(583±202.99)	233-1050	267-931	316-826	422-740
17	0-234(51±44.4)	4-179	7-159	15-113	29-67
18	144-743(316±107.81)	170-650	197-579	213-467	243-362
19	11-336(65±50.26)	13-201	15-187	19-146	31-75

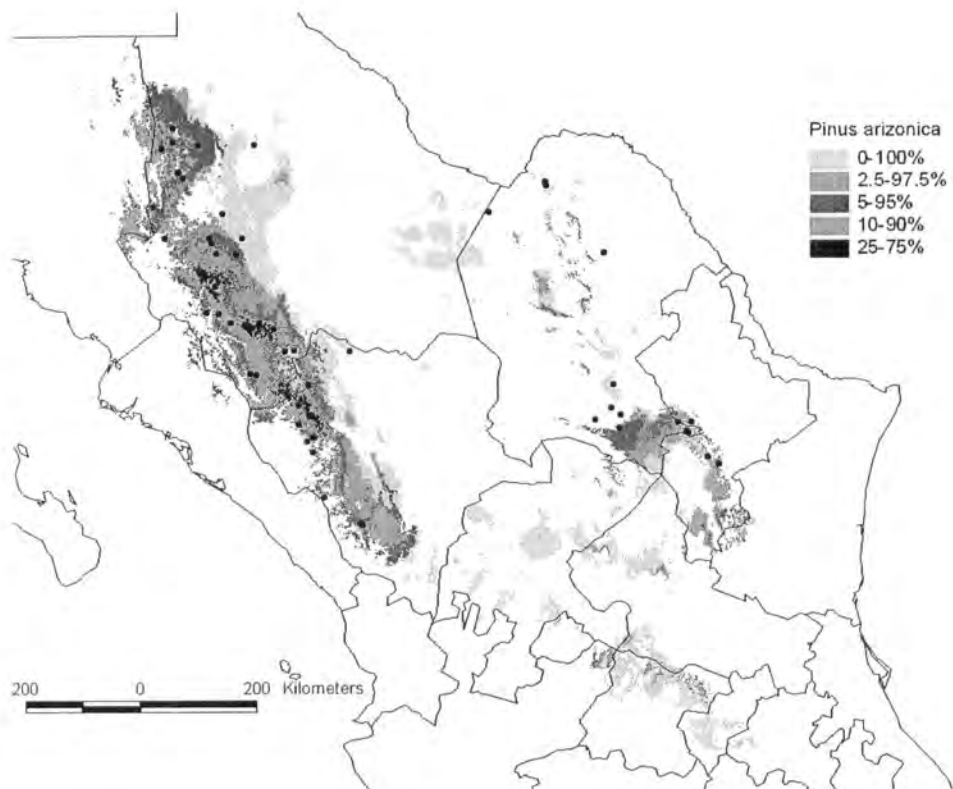


Figura 1. Distribución conocida (puntos) y potencial (áreas sombreadas) de *Pinus arizonica* en México.

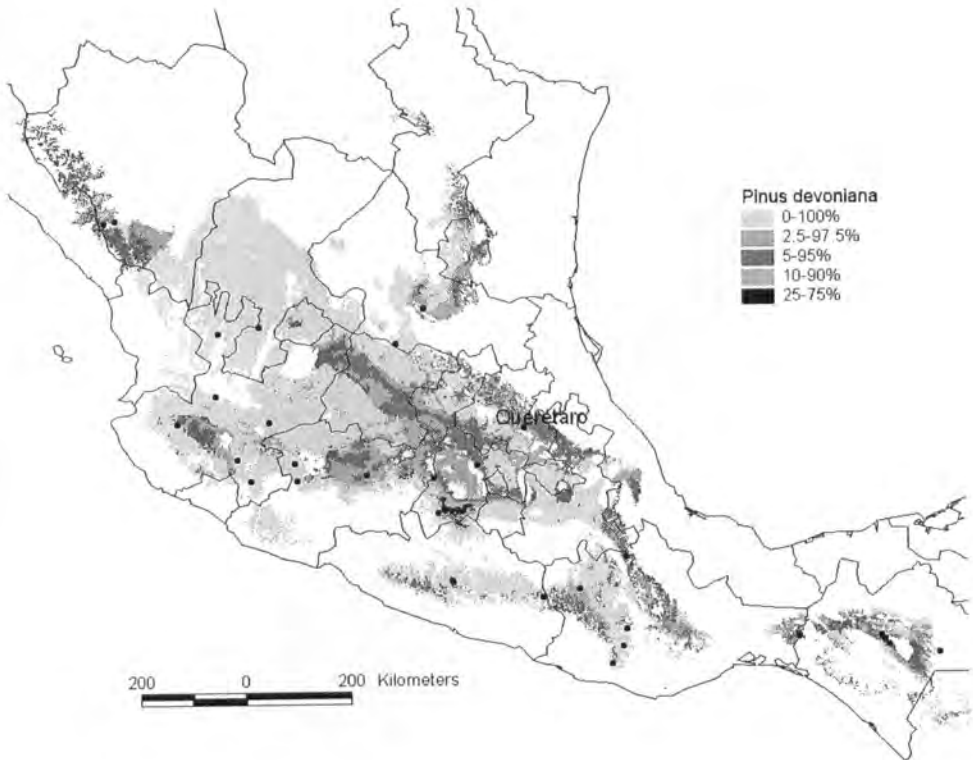


Figura 2. Distribución conocida (puntos) y potencial (áreas sombreadas) de *Pinus devoniana* en México.

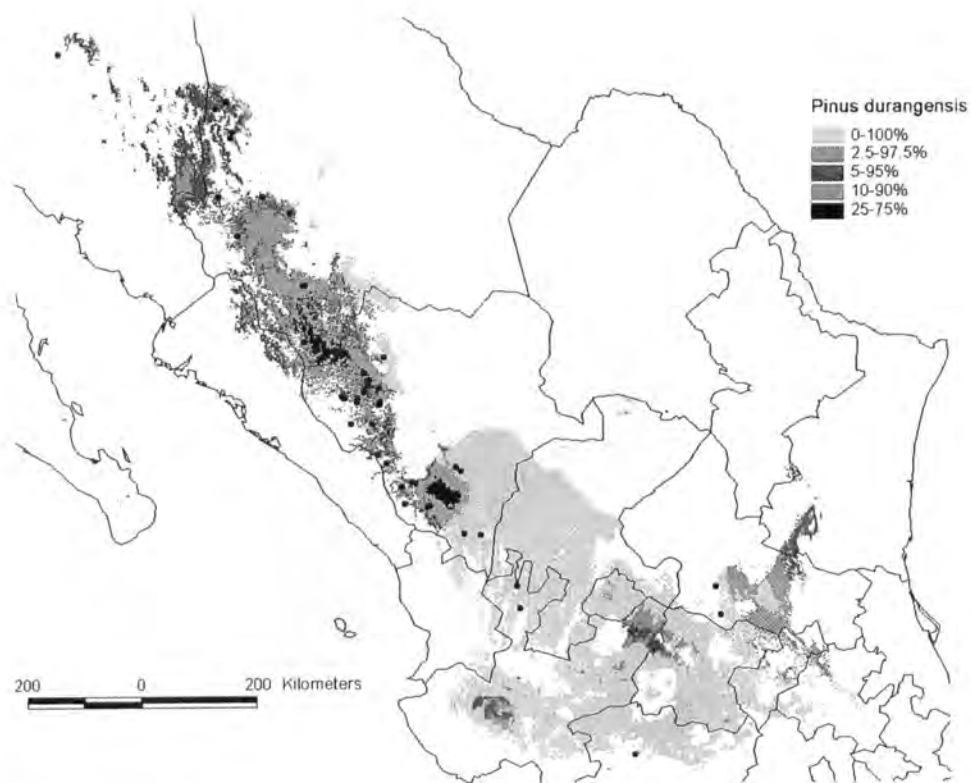


Figura 3. Distribución conocida (puntos) y potencial (áreas sombreadas) de *Pinus durangensis* en México.

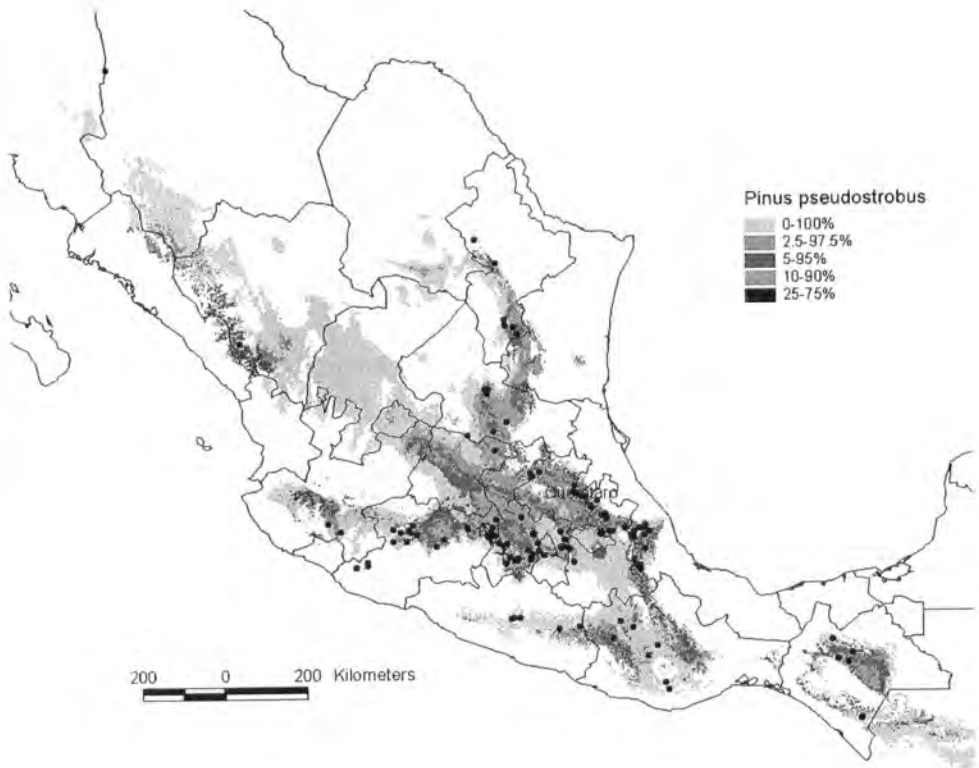


Figura 4. Distribución conocida (puntos) y potencial (áreas sombreadas) de *Pinus pseudostrabus* en México.

P. durangensis se restringe a la Sierra Madre Occidental, es raro encontrarla en el oriente de Sonora y occidente de Chihuahua; por el contrario, es común en Durango, Zacatecas y norte de Jalisco, con poblaciones dispersas y escasas en el sur de esta última entidad y en el norte de Michoacán. El modelo generado concuerda con las áreas registradas en los ejemplares de herbario (Cuadro 4). Sin embargo, la distribución potencial parece estar sobreestimada, hacia partes de Aguascalientes, Zacatecas, Guanajuato, San Luis Potosí e incluso Hidalgo (Figura 3).

P. pseudostrobus se localiza en el Eje Neovolcánico y en territorios aledaños; así, está presente en los estados como Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Distrito Federal, Morelos, Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Se extiende hacia el norte, tanto por la Sierra Madre Occidental en Sinaloa, Durango y Chihuahua, como en la Sierra Madre Oriental en Hidalgo, San Luis Potosí, Tamaulipas y Nuevo León. Al sur en la Sierra Madre del Sur en Guerrero, Oaxaca y en la Sierra Madre de Chiapas, e inclusive llega hasta El Salvador en Centroamérica. En este caso, el modelo de distribución potencial también corresponde en su totalidad con la información conocida (Figura 4 y Cuadro 5).

Con base en la distribución geográfica del perfil bioclimático correspondiente a cada especie, se obtuvo su área potencial (Cuadro 6)

Cuadro 6. Área potencial ocupada por las especies de pino estudiadas con respecto a los porcentajes de las condiciones climáticas (km²)

Especies	intervalos porcentuales					Superficie total
	0-100%	2.5-97.5%	5-95%	10-90%	25-75%	
<i>Pinus arizonica</i>	82,036	40,882	37,668	38,784	3,795	203,165
<i>P. devoniana</i>	278,371	61,560	68,545	33,158	1,347	443,071
<i>P. durangensis</i>	185,376	33,720	30,732	37,423	6,424	293,675
<i>P. pseudostrobus</i>	312,842	92,310	70,613	43,814	3,194	522,773

DISCUSIÓN

Uno de los aspectos más relevantes de este estudio es el relacionado con la confiabilidad de los datos y de las herramientas técnicas utilizadas. La fortaleza y

certeza del método de interpolación y de la cartografía climática digital misma han sido comprobadas de forma exitosa al compararlas con otros procedimientos; en la actualidad son los más reconocidos y efectivos (Price *et al.*, 2000). Las coberturas usadas han sido generadas de modo semejante a las otros países como Australia, Canadá (Price *et al.*, 2000), Nueva Guinea (Nix *et al.*, 1992) y los del Continente Africano (Hutchinson *et al.*, 1995, 1996). Existen dudas acerca de la seguridad de los modelos obtenidos por BIOCLIM, programa que se fundamenta en registros conocidos y georreferenciados con respecto a la cartografía digital ya señalada, que por medio de una asociación simple y la acumulación de frecuencias, calcula los parámetros para cada sitio, lo que permite elaborar tanto los perfiles, como los modelos. En ambos casos, todas las superficies referidas e incluso las aquí usadas para México, han sido sometidas a numerosas pruebas de confiabilidad. Hasta el momento, diversas comparaciones han demostrado gran coincidencia entre las coberturas de temperatura máxima, mínima y precipitación mensual con los parámetros bioclimáticos y la cartografía impresa y digital actual. Sin embargo, las coberturas *raster* muestran la variación celda tras celda, a diferencia de las vectoriales que sólo representan clases en polígonos con cambios cualitativos.

Es importante señalar que debido a la complejidad de los sistemas naturales ha sido difícil modelar la distribución geográfica de las especies de manera inobjetable (Anderson *et al.*, 2003; Pearson y Dawson, 2003). Las limitantes principales se relacionan con la incapacidad de estos procedimientos para explicar las interacciones bióticas, el cambio evolutivo y la dispersión, que son necesarios para manejar el concepto de nicho; lo anterior propicia que los errores en la predicción sean inevitables, independientemente del método utilizado. Así los modelos de distribución potencial tienden a incurrir en sobreestimaciones (Peterson, 2001).

Los modelos bioclimáticos también incluyen errores de omisión al no considerar el espacio que el nicho debe estar ocupando, o bien de comisión al aceptar una superficie que en realidad no llena o no debe llenar (Peterson y Vieglais 2001; Anderson *et al.*, 2003). Todos los algoritmos usados para modelar el nicho ecológico, involucran al menos una combinación específica de ambos tipos de errores. No obstante, los modelos bioclimáticos proporcionan un punto de partida útil para predecir la distribución, tanto para distintos grupos biológicos, como a diferentes escalas de trabajo (Peterson y Vieglais, 2001).

En el presente trabajo se sugiere que los datos intrínsecos de las coberturas climáticas empleadas, asociados con los de distribución de especies con valor económico, pueden ser de gran utilidad.

El punto central a discutir es la posibilidad de correlación de las variables o parámetros climáticos respecto a la distribución conocida de las cuatro especies; ésto ha permitido establecer de manera precisa los perfiles cuantitativos de cada

una de ellas, y sobre todo, la distribución espacial de las condiciones descritas por sus perfiles dentro del territorio nacional de manera gráfica por medio de cartografía digital.

Por lo anterior, es innegable la importancia de incluir el mayor conocimiento biológico disponible, además de ejercicios de modelado bioclimático como los que se presentan en este trabajo, a fin de contar con los datos para delimitar la distribución de especies de valor económico, así como los cuantitativos correspondientes a las variables climáticas de los sitios en donde cada taxa puede prosperar. Al respecto, las bases de datos utilizadas y la generación de observaciones climáticas a una resolución espacial relativamente alta, han demostrado ser invaluable para aplicarlas en estudios forestales.

La información cartográfica y de los perfiles cuantitativos es de gran relevancia, ya que permite reconocer las condiciones más favorables para el desarrollo de los individuos y poblaciones de las especies; detalla en dónde podrían darse esas características climáticas para una mejor producción maderera, o bien para establecer plantaciones forestales.

En la literatura existen numerosos estudios de investigación básica y aplicada, relacionados con el uso de los modelos para predecir la extensión geográfica de las especies; proponer acciones de conservación, revisar los efectos del cambio climático (Télez y Dávila, 2003); para plantaciones tanto con especies nativas como exóticas (Booth, 1996; Fryer, 1996; Nghia, 1996; Samounry y Applegate, 1996) y programas de reforestación o el establecimiento de viveros especializados, entre otros, han confirmado su fortaleza y confiabilidad. Específicamente, en el caso de la restauración mediante la incorporación de plantas, es posible identificar con aquellas áreas que son susceptibles de ser reforestadas.

Otras aplicaciones de interés económico incluyen por ejemplo, la definición de las zonas de procedencia de semilla o propágulos vegetativos importantes comercialmente (Lindenmayer *et al.*, 1994). Así mismo, estos conceptos, métodos y herramientas han sido empleados para generar modelos del comportamiento y productividad de posibles plantaciones forestales con fines comerciales en Tasmania (Nix *et al.*, 1992), en el cual se correlaciona la producción en términos de volumen con diversas variables ambientales.

De manera tradicional sólo ha sido factible asociar la temperatura promedio anual, con la precipitación anual y alguna otra variable como las temperaturas absolutas con la distribución de las especies de *Pinus* (Eguiluz 1977), también se ha intentado correlacionarlas con la producción maderable (Eguiluz 1982). En el presente estudio las diferencias entre los datos publicados (Martínez, 1953; Perry, 1991) y los obtenidos resultaron muy contrastantes. Los valores de los 19 parámetros varían incluso, en varios grados y en centenas de milímetros de

precipitación. Los valores derivados de la investigación pudieran predecir la distribución espacial potencial de los sitios que ofrecieran una alta productividad, de manera cuantitativa y precisa, a partir de la resolución espacial a la que fue realizado este trabajo. Esta última sería una de las ventajas más convenientes para el aprovechamiento forestal, o para el establecimiento de plantaciones.

Además, debido a que existen otras aplicaciones más relacionadas con campos como la biogeografía (Nix, 1986), la ecología y la conservación (Lindenmayer *et al.*, 1991), este tipo de modelos hacen posible proponer estrategias útiles para la diversidad biológica en el contexto del desarrollo sostenible, al definir sitios viables para plantaciones, o zonas con gran riqueza de recursos para recomendarlas como áreas naturales protegidas.

De igual forma, es importante destacar que dichos métodos son valiosos desde el punto de vista del cambio climático global. Así, los pocos estudios sobre el particular están enfocados a especies silvestres con fines de conservación. Téllez y Dávila (2003) mencionan los posibles efectos de ese fenómeno ambiental sobre los patrones de distribución de cactáceas.

Con lo anterior, surge la necesidad de cambiar hacia estrategias de planificación y desarrollo de formas nuevas, flexibles y dinámicas de manejo a largo plazo de los recursos vegetales (Lindenmayer *et al.*, 1991). En esencia, se requiere de la generación de conocimiento que fomente programas, que a su vez, faciliten a los tomadores de decisiones conciliar las eternas diferencias entre la conservación y el desarrollo.

Por último, el presente estudio demuestra que los análisis bioclimáticos a una resolución espacial (1 km^2) son promisorios y muy útiles en investigaciones básicas aplicadas particulares. Pueden servir para identificar áreas específicas y con gran potencial para el aprovechamiento racional de especies maderables y establecimiento de plantaciones, para así asegurar la sobrevivencia presente y futura de estos recursos naturales en el territorio nacional.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten reconocer los patrones de distribución potencial de las especies silvestres bajo estudio y las áreas geográficas, así como la cuantificación de las características climáticas de los sitios (perfiles bioclimáticos) en donde prosperan o podrían desarrollarse, e incluso, para determinar la distribución del uso potencial forestal del país en términos de comunidades, géneros o especies.

REFERENCIAS

- Anderson R. P., D. Lew and A. T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological modelling*. 162:211-232.
- Booth, T. H., Henry A. Nix, M. F. Hutchinson and J. R. Busby. 1987. Grid matching: a new method for homocline analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 39:241-255.
- Booth, T. H. 1996. The development of climatic mapping programs and climatic mapping in Australia. *In*: T. H. Booth (Ed.). *Proceedings of the International Workshop. Matching Trees and Sites*. Bangkok, Thailand. March 27-30, 1995. Australian Centre for International Agricultural Research Proceedings 63:38-42.
- Eguiluz P., T. 1977. Los pinos del mundo. Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México. Publicación especial No. 1. 75 p.
- Eguiluz P., T. 1982. Clima y distribución del género *Pinus* en México. *Revista Ciencia Forestal* 38(7):30-44.
- Environmental Scientific Research Institute (ESRI). 2000. ArcView 3.2. ESRI. Redlands, CA. USA.
- Farjon, A. and B. Styles. 1997. *Pinus* (Pinaceae). *Flora Neotropica Monographs*. 75:1-291.
- Farjon, A., J. Pérez de la Rosa and B. Styles. 1997. A field guide to the pines of México and Central America. The Royal Botanical Gardens. Kew, Richmond. UK. 151 p.
- Fryer, J. H. 1996. Climatic mapping for *Eucalyptus* in Central America. *In*: *Proceedings of the International Workshop. Matching Trees and Sites*. T. H. Booth (Ed.). Bangkok, Thailand. March 27-30, 1995. Australian Centre for International Agricultural Research Proceedings 63:50-55.
- Houlder, D. J., M. F. Hutchinson, H. A. Nix and J. P. McMahon. 2000. ANUCLIM 5.1 User guide. Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, Canberra, Australia. 73 p.
- Hutchinson, M. F. 1991. The application of thin-plate smoothing splines to continent-wide data assimilation. *In*: Jasper, J. D. (Ed.). *BMRC Research Report Series, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia*. pp. 104-113.
- Hutchinson, M. F. 1995a. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographic Information Systems* 9:385-403.
- Hutchinson, M. F. 1995b. Stochastic space-time weather models from ground-based data. *Agricultural and Forest Meteorology* 73:237-264.
- Hutchinson, M. F. 1997. ANUSPLIN. Version 4.1. User guide, Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University. Canberra, Australia.

- Hutchinson, M. F. 1998. Interpolation of rainfall with thin plate smoothing splines: I. Two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 2:152-167.
- Hutchinson, M. F. and P. E. Gessler. 1994. Splines – more than just a smooth interpolator. *Geoderma* 62:45-67.
- Hutchinson, M. F., H. A. Nix., J. P. McMahon and K. D. Ord. 1995. Africa – A topographic and climatic database, version 1.0. Centre for Resources and Environmental Studies, The Australian National University. Canberra, Australia.
- Hutchinson, M. F., H. A. Nix, J. P. McMahon and K. D. Ord. 1996. The development of a topographic and climatic database for Africa. *In: Proceedings of the Third International Conference/Workshop, NCQFA. University of California, Santa Barbara, CA.* pp. 1-6.
- Lindenmayer, D. B., H. A. Nix, J. P. McMahon, M. F. Hutchinson and M. T. Tanton. 1991. The conservation of Leadbeater's possum, *Gymnobelideus leadbeateri* (McCoy): a case study of the use of bioclimatic modelling. *Journal of Biogeography* 18:371-383.
- Lindenmayer, D. B., B. G. Mackey and Nix, H. A. 1994. The bioclimatic domains of four species of commercially important eucalypts from southeastern Australia. *Australian Forestry* 59(2):74-89
- Martínez, M. 1953. Las pináceas mexicanas. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Subsecretaría de Recursos Forestales y Caza. México, D. F. 361 p.
- Nix, H. A. 1986. A Biogeographic analysis of Australian elapid snakes. *In: R. Longmore (Ed.). Atlas of the elapid snakes of Australia. Flora and Fauna* 7: 4-15.
- Nix, H. A., J. A. Stein and J. L. Stein. 1992. Developing an environmental geographic information system for Tasmania: An application for assessing the potential for hardwood plantation forestry. Consultancy report to the Land Resources Division and Bureau of Rural Resources Department of Primary Industries and Energy. Centre for Resources and Environmental Studies. The Australian National University. Canberra, Australia. 174 p.
- Nghia, N. H. 1996. Current methods and future needs for tree growth prediction in Vietnam. *In: T. H. Booth (Ed.). Proceedings of the International Workshop. Matching Trees and Sites. Bangkok, Thailand. March 27-30, 1995. Australian Centre for International Agricultural Research Proceedings* 63: 65-67.
- Pearson, R. G. and T. P. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12:361-371.
- Perry, J. P. Jr. 1991. The pines of Mexico and Central America. Timber Press, Portland, OR. 231 p.

- Peterson, A. T. 2001. Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling. *The Condor* 103:599-605.
- Peterson, A. T. and D. A. Vieglais. 2001. Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem. *BioScience* 51:363-371.
- Price, A., D. W. McKenney, I. A. Nalder, M. F. Hutchinson and J. L. Kesteven. 2000. Comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology* 101:81-94.
- Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG) y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1962. Seminario y viaje de estudio de coníferas latinoamericanas. SAG-FAO. México, D. F. 229 p.
- Samounry, X. and G. Applegate. 1996. Tree growth predictions to support forest plantation development in Laos PDR. *In: Proceedings of the International Workshop. Matching Trees and Sites.* T. H. Booth (Ed.). Bangkok, Thailand. March 27-30, 1995. Australian Centre for International Agricultural Research Proceedings 63:68-70.
- Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre (SFF). 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico 1992-1994. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D. F. 81 p.
- Téllez V., O. and P. Dávila A. 2003. Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the Tehuacan-Cuicatlan biosphere reserve, Mexico. *Conservation Biology* 17(3):846-853.
- Vázquez S., J., W. Barret y E. Little. 1962. Botánica. *In: SAG (Secretaría de Agricultura y Ganadería) y FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).* 1962. Seminario y viaje de estudio de coníferas latinoamericanas. Capítulo II. pp. 12-76.
- Verduzco J., B., R. Füller, R. Morandini, Y. Favre y J. Mahuive. 1962. Ecología y silvicultura. *In: SAG (Secretaría de Agricultura y Ganadería) y FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).* 1962. Seminario y viaje de estudio de coníferas latinoamericanas. Capítulo III. pp. 77-107.
- Villarreal C., R., B. R. Medina y O. E. A. Hernández. 1993. Los recursos forestales de México y su utilización. *In: Memoria del IV Seminario Nacional de la Industria Maderera.* 2ª Ed. INIFAP. Publicación especial 63. pp. 15-36.