

Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México

JOSÉ LUIS VILLASEÑOR*
OSWALDO TÉLLEZ-VALDÉS**

Resumen. Se determinó la distribución potencial de cuatro especies mexicanas del género *Jefea* (Asteraceae) mediante el uso de un programa de modelaje bioclimático (BIOCLIM). Para ello se evaluaron 19 parámetros climáticos y la distribución conocida de las especies obtenida de registros de herbario. El área potencial de cada especie concuerda con algunas propuestas de regionalización del país, como las provincias geomorfológicas, las provincias fitogeográficas o las ecorregiones. Los resultados sugieren que la distribución de estas especies se extiende a 26 regiones terrestres prioritarias de México, aunque los registros de herbario solamente registran su presencia en seis de ellas.

Palabras clave: BIOCLIM, distribución potencial, *Jefea*, Asteraceae, México

Abstract. Based on a bioclimatic modeling program (BIOCLIM), the potential distribution of four Mexican species of *Jefea* (Asteraceae) was determined. The system evaluated 19 climatic parameters along with the current known distribution obtained from herbarium specimens. The predicted distribution of all species agrees with different regional schemes that have been devised for the country, such as geomorphological or phytogeographical provinces, or the ecoregions. The results suggest that the potential distributions of these species extend into 26 Mexican priority terrestrial regions for conservation, whereas herbarium records are represented only in six of such regions.

Key words: BIOCLIM, potential distribution, *Jefea*, Asteraceae, Mexico

* Instituto de Biología, UNAM, Departamento de Botánica, Apartado postal 70-233, 04510 México, D. F. vrios@ibiologia.unam.mx

** Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM, Unidad de Biotecnología y Prototipos. Laboratorio de Recursos Naturales, Av. de Los Barrios 1; Los Reyes; 54090, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, México. tellez@servidor.unam.mx

Introducción

El recuento completo de la diversidad biológica de México es una tarea muy difícil. Aunque el país está considerado entre los de más alta riqueza biológica mundial (Groombridge, 1992; Heywood y Davis, 1997; Villaseñor, 2003), todavía es considerable el rezago en la documentación de su riqueza. Diversos grupos vegetales se han estudiado, taxonómica o biogeográficamente, pero la gran mayoría cuenta únicamente con un nombre científico y algunos datos sobre su variación morfológica y distribución geográfica, almacenados en la información asociada a los ejemplares de herbario.

Poca atención se ha puesto a la distribución geográfica de las plantas mexicanas. Se han discutido aspectos generales de la distribución de conjuntos de taxa a nivel de tipos de vegetación o de sus afinidades geográficas; igualmente, se han registrado patrones de riqueza local o regional a partir de estudios florísticos, pero poco o nada se ha hecho para documentar el área total que una especie ocupa. Los escasos esfuerzos en esta dirección han dado como resultado mapas de distribución, en los cuales los taxa se representan como un conjunto de puntos, cada punto representando una localidad de recolecta. Al unir los puntos periféricos, se circunscribe un área que representa la distribución geográfica de la especie. Lo anterior se hace sin un marco teórico formal, solamente definido por la experiencia del taxónomo (Rapoport, 1982; Skov, 2000). Otras formas de representar la distribución geográfica de las especies han sido el registro dentro de límites políticos (estados, municipios, etc.), o bien, dentro de cuadros de superficie definida (grados o minutos de latitud y longitud o hectáreas o kilómetros cuadrados).

Con el propósito de conocer más precisamente la distribución geográfica de los organismos, se han propuesto diversos modelos predictivos que ayudan a estimar su distribución potencial (Nix, 1986; Carpenter *et al.*, 1993; Butterfield *et al.*, 1994; Sánchez-Cordero *et al.*, 2001; Anderson *et al.*, 2003). De esta manera, se han propuesto métodos formales y rigurosos para predecir áreas donde pudiera existir un taxon de interés. Los modelos ayudan a determinar dónde se encuentran las condiciones ambientales más adecuadas para que la especie prospere, en función de parámetros obtenidos de recolectas previas. Dichos modelos han demostrado su utilidad en estudios que evalúan patrones de distribución de organismos, como son algunos análisis biogeográficos, ecológicos o de conservación (Anderson *et al.*, 2003). En Australia, por ejemplo, la modelación de la distribución geográfica de especies y taxa supraespecíficos permite identificar patrones generales de biodiversidad, lo que facilita decidir acerca de las prioridades de conservación a gran escala (Chapman y Busby, 1994).

La mayoría de los modelos que predicen la presencia probable de una especie en un sitio no explorado, generalmente correlacionan los sitios ya conocidos donde la especie prospera con un conjunto de factores ambientales, especialmente climáticos (Chapman y Busby, 1994). El clima es un factor importante que afecta o determina la distribución de los organismos; por tal motivo, los análisis de las

variables climáticas ayudan a entender por qué una especie crece en un determinado sitio y no en otro (Lindenmayer *et al.*, 1991). Cada especie tiene su propio perfil bioclimático, por lo que el análisis de las variables que determinan dicho perfil puede servir para cuantificar las diferencias en los dominios climáticos (es decir, el nicho climático o espacio en el cual se considera que una especie vegetal sobrevive bajo condiciones naturales) que tienen diferentes especies (Fischer *et al.*, 2001).

Algunos modelos utilizan métodos estadísticos, siendo los más comunes el de regresión múltiple o los multivariados (por ejemplo, Austin, 1998 o Guisan *et al.*, 1999). Otros hacen uso de los Sistemas de Información Geográfica, como son los análisis de discrepancias (*gap analysis*, Scott y Csuti, 1997) y otros utilizan los registros de presencia de las especies y la información ambiental para generar perfiles bioclimáticos, por ejemplo BIOCLIM (Nix, 1986; Lindenmayer *et al.*, 1991; Fischer *et al.*, 2001) o GARP (Anderson *et al.*, 2003).

Las colecciones científicas (herbarios y museos) constituyen las bases de datos de la biodiversidad. Ellas conservan la información con la cual se genera el conocimiento de la riqueza biológica y de su repartición geográfica (Sánchez-Cordero *et al.*, 2001). Dicha información, combinada con los datos ambientales ha permitido llevar a cabo ejercicios encaminados a predecir la distribución potencial de las especies y a estimar la extensión que su nicho ecológico pudiera alcanzar (Anderson *et al.*, 2003).

En este trabajo se usó el programa BIOCLIM para obtener los perfiles bioclimáticos de cuatro especies mexicanas de Asteraceae, con el fin de definir los posibles límites de su distribución geográfica. Se discute además la utilidad que este tipo de métodos aporta para la modelación de áreas potenciales de distribución de especies vegetales y su papel en el diseño de estrategias de conservación.

Materiales y métodos

Los métodos del programa BIOCLIM han sido descritos con detalle por Nix (1986) y Lindenmayer *et al.*, (1991). Por medio del análisis de perfiles bioclimáticos, BIOCLIM determina teóricamente los límites probables de la distribución de una especie (Lindenmayer *et al.*, 1991). Una vez definidas las localidades con condiciones climáticas similares (homoclimas), es posible generar mapas que muestren la distribución potencial de los taxa. BIOCLIM requiere de un modelo digital de elevación del área de estudio (MDE) y de un conjunto de puntos georreferenciados que representen sitios donde la especie crece. Con ellos genera un perfil bioclimático que sintetiza las condiciones climáticas de los sitios analizados y los compara con los atributos climáticos de un conjunto de celdas generados por el MDE (Fischer *et al.*, 2001). Tal comparación permite determinar aquellos sitios con clima adecuado (dominio), en los cuales pudiera encontrarse la especie bajo estudio.

En los trabajos que han utilizado BIOCLIM para generar áreas potenciales de distribución, se han definido dos tamaños principales de áreas: una denominada dominio central (*core domain*) y otra dominio extenso (*range domain*). El dominio

central está definido por un conjunto de celdas que registran homoclimas para la especie dentro de valores porcentuales que caen en el intervalo de 5-95%, mientras que el dominio extenso incluye celdas que caen dentro de valores porcentuales que van de 0-100% del área total estimada. En este trabajo se hizo una búsqueda homoclimática evaluando todos los intervalos porcentuales del perfil bioclimático (dominio extenso). Se identificaron así todas aquellas celdas, de un mapa de celdas (*raster*) de México, donde las condiciones climáticas para la especie se ubicaron en el intervalo máximo de tolerancia (valores extremos).

Como estudio de caso se seleccionó el género *Jefea* Strother (familia Asteraceae), debido al reducido número de especies que contiene (*J. brevifolia* (A. Gray) Strother, *J. gnaphalioides* (A. Gray) Strother, *J. lantanifolia* (Schauer) Strother y *J. pringlei* (Greenm.) Strother). Además, el género ha sido estudiado taxonómicamente en detalle (Strother, 1991) y existe un número razonable de registros conocidos para desarrollar el presente estudio. Excepto por *J. brevifolia*, que se distribuye un poco más allá de la frontera norte, en el suroeste de Texas, las otras especies son endémicas de México. Strother (1991) las caracterizó taxonómicamente, discutió sus afinidades ecológicas y aportó datos sobre su distribución geográfica, con base en ejemplares de herbario depositados en diversas colecciones institucionales. En el Herbario Nacional de la Universidad Nacional Autónoma de México (MEXU) se tiene un banco de información de los especímenes allí depositados y que documenta la distribución geográfica conocida de las especies en cuestión; todas las localidades de recolecta están georreferenciadas. Este banco se ha complementado con registros citados en la literatura (Strother, 1991). En el Cuadro 1 se presenta un resumen del número de registros por especie que se usaron en este estudio, de los tipos de vegetación en los que se recolectaron y el intervalo altitudinal donde se les encuentra.

El perfil bioclimático de cada especie fue generado utilizando 19 parámetros (Cuadro 2). BIOCLIM calculó para cada atributo los valores mínimos y máximos, así como su promedio y su desviación estándar. De este modo, fue posible elaborar los modelos de distribución de cada especie, generados como archivos en formato ASCHGRID ARCINFO, utilizando el programa BIOMAP del paquete ANUCLIM (incli-

Cuadro 1. Datos generales sobre las especies mexicanas de *Jefea* utilizadas en el análisis bioclimático

Especie	Registros en herbario	Tipo de vegetación	Intervalo altitudinal (m)
<i>J. brevifolia</i>	19	6	1300-2100
<i>J. gnaphalioides</i>	18	5, 6	1070-2150
<i>J. lantanifolia</i>	19	1, 2, 3, 5, 6	1550-2100
<i>J. pringlei</i>	23	4, 5, 6	1350-2600

1: bosque de *Pinus*, 2: bosque de *Pinus-Quercus*, 3: bosque de *Quercus*, 4: bosque tropical caducifolio, 5: chaparral, 6: matorral xerófilo.

Cuadro 2. Parámetros utilizados por el programa BIOCLIM para generar los mapas de distribución potencial de las cuatro especies de *Jefea*.

-
1. Temperatura promedio anual (°C)
 2. Oscilación diurna de la temperatura (°C)
 3. Isotermalidad (°C) (cociente entre parámetros 2 y 7)
 4. Estacionalidad de la temperatura (coeficiente de variación, en %)
 5. Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)
 6. Temperatura mínima promedio del periodo más frío (°C)
 7. Oscilación anual de la temperatura (°C) (cociente entre parámetros 5 y 6)
 8. Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso (°C)
 9. Temperatura promedio del cuatrimestre más seco (°C)
 10. Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido (°C)
 11. Temperatura promedio del cuatrimestre más frío (°C)
 12. Precipitación anual (mm)
 13. Precipitación del periodo más lluvioso (mm)
 14. Precipitación del periodo más seco (mm)
 15. Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación, en %)
 16. Precipitación del cuatrimestre más lluvioso (mm)
 17. Precipitación del cuatrimestre más seco (mm)
 18. Precipitación del cuatrimestre más cálido (mm)
 19. Precipitación del cuatrimestre más frío (mm)
-

do en BIOCLIM) y el modelo digital de elevación (MDE). El MDE utilizado en este trabajo consistió de celdas de 30 segundos (aproximadamente 1 km² de superficie) de resolución espacial.

Finalmente, las áreas definidas por el sistema y que representan los ambientes climáticos adecuados donde pudieran prosperar las especies, fueron representadas en mapas de distribución potencial generados con el programa ArcView 3.2 (ESRI, 2000).

Resultados

En el Cuadro 3 se presentan los valores máximos y mínimos (incluyendo el promedio y la desviación estándar) de cada uno de los parámetros utilizados, obtenidos con el sistema BIOCLIM. Las figuras 1 a 4 ilustran los sitios de recolecta de las especies de *Jefea* en México y sus áreas de distribución potencial. En la mayoría de los casos los sitios de recolecta se ubicaron dentro del área potencial predicha.

Jefea brevifolia se distribuye en el norte de México, ocupando porciones de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí y Zacatecas (Fig. 1). Su distribución se extiende hasta el sur de Texas en los Estados Unidos. Ocupa una gran extensión de la Altiplanicie Mexicana, creciendo en comunidades vegetales características de ambientes xerófilos (Figs. 5, 6).

Cuadro 3. Perfiles bioclimáticos de las especies de *Jefea* en México. El número a la izquierda corresponde al parámetro enunciado en el Cuadro 2. Valores mínimos y máximos; entre paréntesis el promedio y la desviación estándar

	<i>J. brevifolia</i>	<i>J. graphaiooides</i>	<i>J. lantanifolia</i>	<i>J. pringlei</i>
1	14.5-21.1 (18.5±1.72)	15.6-21.9 (18.5±1.41)	13.5-21.1 (18.4±2.07)	14.5-21.7 (16.7±1.64)
2	11.3-19.6 (16.4±1.88)	12.6-16.8 (15.6±1.06)	12-17.1 (15±1.32)	13.4-15.9 (14.3±0.71)
3	0.44-0.68 (0.55±0.06)	0.53-0.66 (0.62±0.03)	0.59-0.66 (0.62±0.02)	0.64-0.69 (0.67±0.01)
4	0.88-2.42 (1.64±0.4)	0.72-1.47 (1.05±0.15)	0.66-1.13 (0.95±0.13)	0.49-0.66 (0.58±0.05)
5	24.8-36 (32.8±3.13)	26.2-34 (30.4±1.69)	23.8-33.6 (30±2.54)	25.2-33.4 (27.4±1.80)
6	-0.9-4.6 (2.6±1.59)	3.1-7.8 (5.3±1.13)	3.1-9 (5.8±1.65)	3.6-9.5 (6.1±1.46)
7	20.3-35.9 (30.2±3.95)	20.7-26.7 (25.1±1.24)	19.6-26.6 (24.2±1.74)	19.6-23.8 (21.4±0.93)
8	16.3-26.2 (23±2.69)	16.8-25.7 (21.3±1.66)	14.2-23.3 (20.5±2.39)	15-23.2 (17.8±1.73)
9	10.9-18.8 (15.3±2.04)	13.3-18.6 (15.3±1.7)	11.3-18 (15.6±1.98)	12.3-19.3 (14.5±1.60)
10	17.6-27.1 (24±2.78)	18-26.2 (21.7±1.63)	15.8-24.5 (21.3±2.29)	16.4-24.1 (18.8±1.73)
11	8.4-14.3 (12±1.47)	11.1-16.3 (14.2±1.28)	11-17.1 (14.4±1.73)	12.3-19 (14.4±1.5)
12	184-470 (342±71.87)	431-872 (551±96.5)	334-1118 (645±215.66)	420-643 (541±59.81)
13	8-24 (18±4.02)	16-45 (25±6.59)	12-63 (32±13.99)	24-36 (30±3.51)
14	(0)	(0)	(0)	(0)
15	53-106 (82±16.94)	63-88 (71±5.81)	60-90 (76±8.01)	83-104 (92±5.08)
16	91-276 (191±43.98)	191-429 (257±54.12)	143-551 (314±112.59)	215-343 (275±36.28)
17	0-57 (13±19.27)	36-57 (46±5.93)	0-66 (43±15.06)	0-26 (1±5.48)
18	82-219 (151±34.19)	175-269 (223±27.58)	135-392 (229±68.95)	139-220 (189±22.18)
19	16-75 (35±13.45)	40-58 (49±5.51)	35-75 (50±12.15)	8-28 (19±4.08)

Jefea gnaphalioides cuenta con registros en el sureste de Coahuila, el suroeste de Tamaulipas, la porción central de San Luis Potosí y la porción central de Hidalgo (Fig. 2). Se ha encontrado en matorrales xerófilos y en chaparrales, estos últimos dominados por arbustos esclerófilos. Su área de distribución se ubica también en la Altiplanicie Mexicana, especialmente en su extremo oriental. A diferencia de *J. brevifolia*, ocupa sitios con suelos principalmente calcáreos, con condiciones de sequía menos extremas, debidas a una mayor precipitación anual.

Jefea lantanifolia se distribuye también en la porción oriental de la Altiplanicie Mexicana, con registros en el oeste de Hidalgo, el sur de Nuevo León, San Luis Potosí, el noroeste de Querétaro y el suroeste de Tamaulipas (Fig. 3). Se encuentra en diferentes tipos de suelos y sustratos geológicos y es la especie que se ha registrado en un mayor número de tipos de vegetación. Se encuentra tanto en bosques templados (bosques de *Pinus*, *Pinus-Quercus* o *Quercus*), como en chaparrales o matorrales xerófilos, ya que su distribución se extiende a algunas porciones de la Sierra Madre Oriental, en la zona de confluencia de Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas. Para esta especie, el modelo extiende su área de distribución potencial a porciones de los estados de Guanajuato, Jalisco y Zacatecas (Fig. 3).

Finalmente, *Jefea pringlei*, a diferencia de las otras tres especies, presenta una distribución más sureña, creciendo en las comunidades xerófilas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, en los estados de Oaxaca y Puebla (Fig. 4) y unos cuantos registros en el bosque tropical caducifolio. Para esta especie, el modelo predice que su área de distribución potencial se extiende hasta el centro-sur del estado de Oaxaca (Fig. 4).

Las distribuciones potenciales de estas cuatro especies abarcan regiones en las cuales no han sido registradas hasta la fecha. Además, las áreas estimadas para cada una de ellas concuerdan con algunos accidentes orográficos o con propuestas de divisiones biogeográficas (Figs. 5, 6, 7). Analizando de manera general la distribución potencial del género, se observa que sus cuatro especies se ubican dentro de las provincias biogeográficas del centro-oriental del país, abarcando principalmente las regiones chihuahuense y zacatecana-potosina del Altiplano Mexicano, una pequeña porción de la Sierra Madre Oriental y la región que ocupa el Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Fig. 5).

Las cuatro especies también se distribuyen con bastante coherencia a lo largo del área ocupada por los matorrales xerófilos del Altiplano Mexicano y del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Fig. 6). Asimismo, su distribución concuerda con las regiones geomorfológicas en que se ha dividido el país (Fig. 7).

En el Cuadro 4 se indica la superficie estimada que ocupa cada taxon. *Jefea brevifolia* es la especie que presenta una mayor extensión (más de 260 000 km²), en tanto que *J. pringlei* es la que tiene la menor extensión (casi 6 000 km²). El bajo número de registros en los herbarios de cada una de las especies sugiere que no son especies comunes en el paisaje, a pesar de que su área de distribución potencial es relativamente grande.

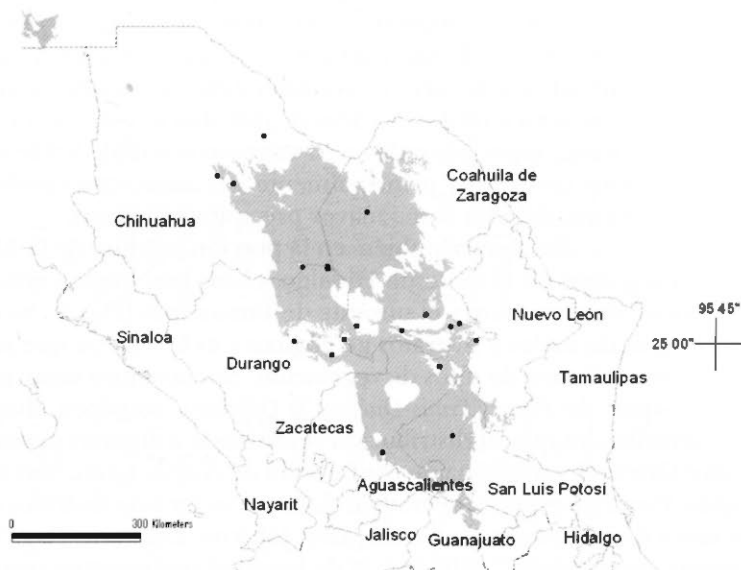


Fig. 1. Distribución conocida (puntos) y potencial (área sombreada) de *Jefeá brevifolia* en México.

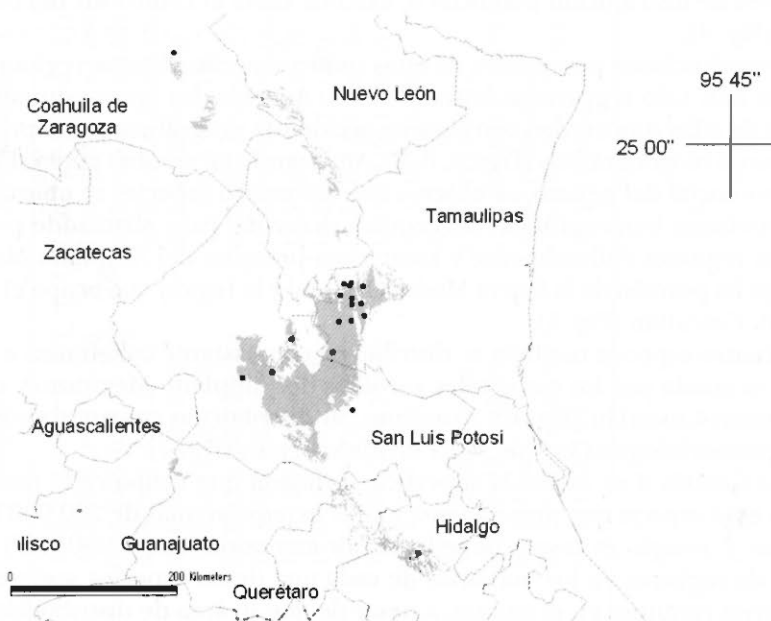


Fig. 2. Distribución conocida (puntos) y potencial (área sombreada) de *Jefeá gnaphalioides* en México.



Fig. 3. Distribución conocida (puntos) y potencial (área sombreada) de *Jefealantaniifolia* en México.

El número de registros dividido entre el logaritmo de la superficie estimada, puede utilizarse como una medida estándar de la densidad de individuos (o poblaciones, si se acepta que el ejemplar recolectado forma parte de una población muestreada) (Rejmánek, 1996). Como se utiliza el logaritmo base 10, el cociente puede ser considerado como el valor promedio del número de especímenes por cada 10 km² (Cuadro 4). Así, *J. brevifolia* presenta una densidad de 3.5 individuos/poblaciones por cada 10 km², *J. gnaphalioides* de 4.2, *J. lantaniifolia* de 4.0 y *J. pringlei* de 6.1, todas ellas mostrando valores no muy diferentes (intervalo= 2.6). Tales densidades

Cuadro 4. Área potencial de distribución de las especies de *Jefealantaniifolia* y densidad de registros por unidad de superficie (en escala logarítmica)

	Área potencial (km ²)	Registros/Logsup
<i>J. brevifolia</i>	263 262	3.5
<i>J. gnaphalioides</i>	21 292	4.2
<i>J. lantaniifolia</i>	55 853	4.0
<i>J. pringlei</i>	5 680	6.1

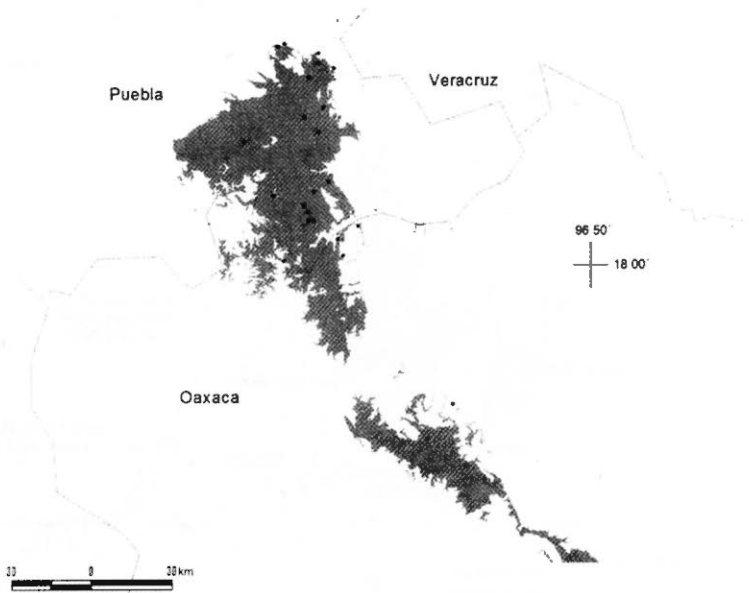


Fig. 4. Distribución conocida (puntos) y potencial (área sombreada) de *Jefeá pringlei* en México.

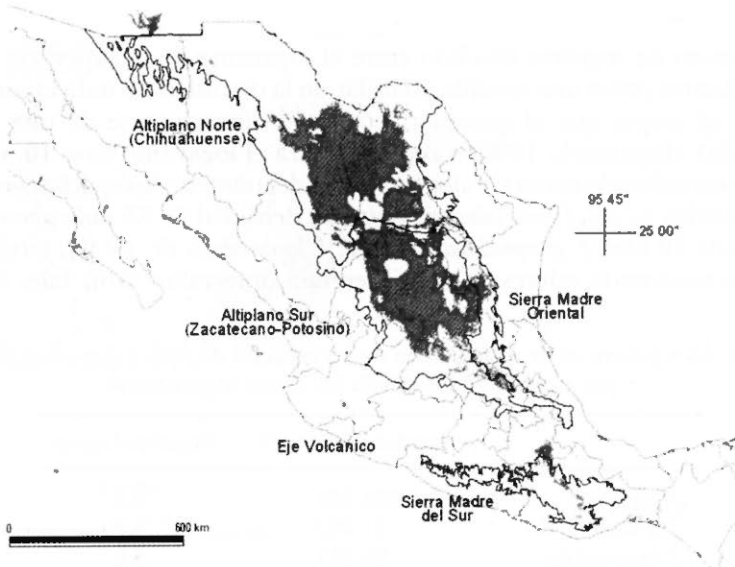


Fig. 5. Distribución geográfica potencial de *Jefeá* con relación a las provincias biogeográficas de México.

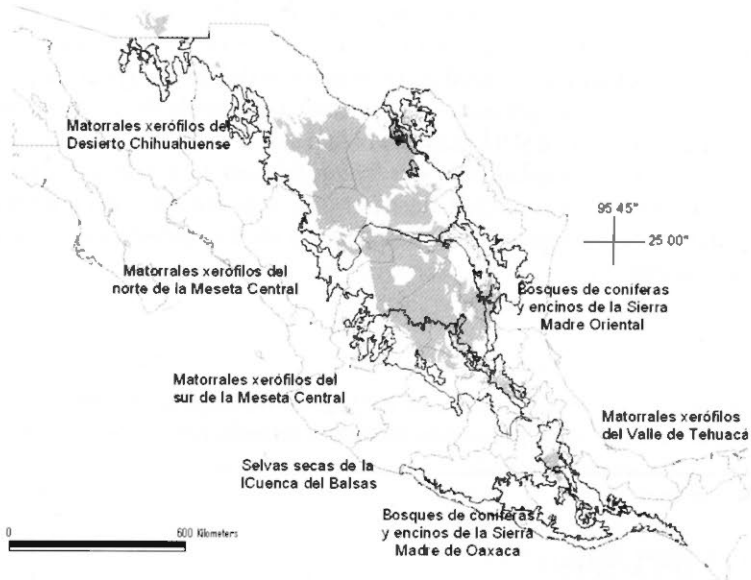


Fig. 6. Distribución geográfica potencial de *JefeA* con relación a las ecorregiones de México.



Fig. 7. Distribución geográfica potencial de *JefeA* con relación a las provincias geomorfológicas de México.

sugieren que las especies de *Jefea* son elementos más bien escasos en el paisaje y en consecuencia sus individuos no son elementos comunes en los herbarios.

La evaluación del área potencial de distribución del género *Jefea* (Figs. 5, 6 y 7) comprende, al menos parcialmente, zonas ubicadas dentro de 26 regiones terrestres prioritarias definidas por la CONABIO (Arriaga *et al.*, 2000). *J. brevifolia* se registra en 16 de ellas, *J. gnaphalioides* y *J. lantanifolia* en 10 y *J. pringlei* en una. Sin embargo, la distribución conocida hasta ahora, a partir de los especímenes de herbario, solamente documenta la existencia de dichas especies en seis regiones prioritarias (Cuadro 5).

Cuadro 5. Regiones prioritarias terrestres de México (Arriaga *et al.*, 2000) y especies de *Jefea* que probablemente están presentes en ellas de acuerdo con su distribución potencial

Región prioritaria	Estado	Especie
Cañón de Santa Elena	Chihuahua	1
El Berrendo	Chihuahua	1
Laguna Jaco	Chihuahua	1
Pastizales del N del Río Santa María	Chihuahua	1
Sierra de San Luis-Janos	Chihuahua	1
Sierra de la Madera	Coahuila	1
Sierra El Burro-Río San Rodrigo	Coahuila	1
Sierras La Encantada-Santa Rosa	Coahuila	1
Sierra La Fragua	Coahuila	1
Sierra La Paila	Coahuila	1,2*
Sierra Maderas del Carmen	Coahuila	1
Cuchillas de la Zarca	Durango	1
Mapimí	Durango	1*
Sierras Santa Bárbara-Santa Rosa	Guanajuato	3
Cañón de Iturbide	Nuevo León	2,3
El Potosí-Cumbres de Monterrey	Nuevo León	1,2,3
Tóquio	Nuevo León	1
Valle de Tehuacán-Cuicatlán	Oaxaca-Puebla	4*
Cerro Zamorano	Querétaro	3
Sierra Gorda-Río Moctezuma	Querétaro	2,3*
El Huizache	San Luis Potosí	1,2*,3*
Llanura de Río Verde	San Luis Potosí	2,3
Sierra de Álvarez	San Luis Potosí	2,3*
El Cielo	Tamaulipas	2,3
San Antonio-Peña Nevada	Tamaulipas	2,3
Valle de Jaumave	Tamaulipas	2

* Recolectadas en la región prioritaria y de las cuales se conocen ejemplares de herbario. 1= *J. brevifolia*, 2= *J. gnaphalioides*, 3= *J. lantanifolia*, 4= *J. pringlei*

Discusión

No es posible determinar cuánto sobreestima el modelo las áreas de distribución potencial; solamente con trabajo de campo se podrá determinar qué tanto el sistema extiende más allá de sus límites reales la distribución de cada especie. No obstante, los resultados sugieren que el método empleado (BIOCLIM) predice de manera satisfactoria la distribución potencial de las especies. Por lo tanto, los mapas obtenidos pueden servir de guía para dirigir el trabajo de campo hacia sitios específicos; por ejemplo, las áreas prioritarias para la conservación donde, según el modelo, las especies podrían encontrarse, pero para las cuales todavía no existe una prueba fehaciente de su presencia.

Diversos trabajos documentan la importancia de estimar el área de distribución potencial mediante el modelado de variables climáticas (Lindenmayer *et al.*, 2000; Fischer *et al.*, 2001). Tal información se ha utilizado para contestar preguntas de índole biogeográfica (Nix, 1986), ecológica (Lindenmayer *et al.*, 1991), taxonómica (Fischer *et al.*, 2001), de conservación (Téllez y Dávila, 2003) o de aprovechamiento sustentable (Lindenmayer *et al.*, 1996). Se propone el uso de estos modelos para entender aspectos relevantes de la distribución geográfica de las especies, así como las variables climáticas que determinan dicha distribución.

Algunos autores subrayan la necesidad de contar con más y mejor información para un modelado eficiente de la distribución potencial de las especies. Lindenmayer *et al.*, (1996) y Peterson *et al.*, (2000) sugieren el uso de un mínimo de 50 localidades con sus coordenadas geográficas bien determinadas para efectuar un análisis como el que se realiza aquí.

En este trabajo se utilizaron únicamente entre 18 y 23 localidades (Cuadro I). Ninguna especie cumple las condiciones deseables sugeridas. Desafortunadamente, este podría ser el escenario general para la mayoría de las especies de la flora de México; por lo general los herbarios cuentan con pocos registros, sobre todo de aquellas con especial interés, como son las endémicas.

Debido a que los modelos en general tienden a sobreestimar la distribución potencial, algunos autores, como Peterson (2001), consideran que es una de las deficiencias de BIOCLIM. Sin embargo, los mapas presentados pueden servir como base para orientar el trabajo futuro que defina con mayor precisión parte del nicho potencial de las especies, representado por su distribución geográfica. Será interesante comparar estos mapas con los que se obtengan mediante otras estrategias, como el del programa de modelado GARP (Genetic Algorithm for Rule Set Prediction) por sus siglas en inglés (Sánchez-Cordero *et al.*, 2001; Anderson *et al.*, 2003). De igual importancia para validar los modelos aquí presentados será el trabajo de campo que en un futuro próximo ayude a registrar nuevos sitios de recolecta de las especies; si los sitios se ubican dentro de las áreas estimadas, el modelo será robusto.

Debido a su complejidad, los sistemas naturales no permiten una adecuada modelación de la distribución geográfica de las especies (Anderson *et al.*, 2003;

Pearson y Dawson, 2003), principalmente por su incapacidad para explicar las interacciones bióticas, el cambio evolutivo y la dispersión, ocasionando que los errores en la predicción sean inevitables, independientemente del método utilizado.

Los modelos bioclimáticos propuestos sufren además errores de omisión (no consideran el espacio que la especie debería estar ocupando) y de comisión (consideran un espacio que en realidad la especie no ocupa o no debe ocupar) (Peterson y Vieglais, 2001; Anderson *et al.*, 2003). Todos los algoritmos usados para modelar la distribución potencial, involucran al menos una combinación específica de ambos tipos de errores. No obstante, la importancia de los modelos bioclimáticos no debe subestimarse, ya que proporcionan un punto de partida útil para predecir la distribución potencial, tanto para distintos grupos biológicos como a distintas escalas (Peterson y Vieglais, 2001).

La distribución potencial de las especies, definida con la información actualmente disponible, puede servir para determinar sitios importantes de concentración de especies (particularmente endémicas). También puede ser útil para estimar la diversidad de las áreas naturales protegidas (muchas de ellas sin un recuento de su riqueza florística) y así planificar o diseñar mejor un sistema de áreas naturales protegidas (Peterson *et al.*, 2000). Lindenmayer *et al.* (1996) discutieron la utilidad de estos métodos como referencia para establecer, en los sitios más adecuados, plantaciones para la propagación de especies en peligro de extinción o de especial interés comercial. En particular, para los estudiosos de la diversidad vegetal de México, la información de este tipo sería útil como fuente de información potencial para estudios taxonómicos y biogeográficos.

Agradecimientos. Agradecemos a Verónica Juárez, Emily J. Lott y Enrique Martínez-Meyer la lectura y los comentarios al manuscrito. Dos revisores anónimos ayudaron con sus observaciones a mejorar substancialmente el texto y las ideas expuestas.

Literatura citada

- ANDERSON, R. P., D. LEW Y A. T. PETERSON. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162: 211-232.
- ARRIAGA, L., J. M. ESPINOZA, C. AGUILAR, E. MARTÍNEZ, L. GÓMEZ Y E. LOA (coordinadores). 2000. *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 609 p.
- AUSTIN, M. P. 1998. An ecological perspective on biodiversity investigations: examples from Australian eucalypts forests. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 85: 2-17.
- BUTTERFIELD, B. R., B. CSUTI Y J. M. SCOTT. 1994. Modeling vertebrate distributions for gap analysis. In: R. I. Miller (ed.). *Mapping the diversity of nature*. Chapman & Hall, London, pp. 53-68.
- CARPENTER, G., A. N. GILLISON Y J. WINTER. 1993. DOMAIN: a flexible modeling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation* 2: 667-680.

- CHAPMAN, A. D. Y J. R. BUSBY. 1994. Linking plant species information to continental biodiversity inventory, climate modeling and environmental monitoring. In: R. I. Miller (ed.). *Mapping the diversity of nature*. Chapman & Hall, London, pp. 179-195.
- ESRI (ENVIRONMENTAL SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE) 2000. *ArcView 3.2*. ESRI, Redlands, California.
- FISCHER, J., D. B. LINDENMAYER, H. A. NIX, J. L. STEIN Y J. A. STEIN. 2001. Climate and animal distribution: a climatic analysis of the Australian marsupial *Trichosurus caninus*. *Journal of Biogeography* 28: 293-304.
- GROOMBRIDGE, B. (ed.). 1992. *Global biodiversity. Status of the Earth's living resources*. Chapman & Hall, London. 585 p.
- GUISAN, A., S. B. WEISS Y A. D. WEISS. 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143: 107-122.
- HEYWOOD, V. H. Y S. D. DAVIS. 1997. Introduction. In: S. D. Davis, V. H. Heywood, O. Herrera-MacBryde, J. Villa-Lobos y A. C. Hamilton (eds.) *Centers of plant diversity. A guide and strategy for their conservation. vol. 3, The Americas*. WWF/UICN, Cambridge, pp. 1-38.
- LINDENMAYER, D. B., B. G. MACKEY, R. B. CUNNINGHAM, C. F. DONNELLY, I. C. MULLEN, M. A. MCCARTHY Y A. M. GILL. 2000. Factors affecting the presence of the cool temperate rain forest tree myrtle beech (*Nothofagus cunninghamii*) in southern Australia: integrating climatic, terrain and disturbance predictors of distribution patterns. *Journal of Biogeography* 27: 1001-1010.
- LINDENMAYER, D. B., B. G. MACKEY Y H. A. NIX. 1996. The bioclimatic domains of four species of commercially important eucalypts from south-eastern Australia. *Australian Forestry* 59: 74-89.
- LINDENMAYER, D. B., H. A. NIX, J. P. McMAHON, M. F. HUTCHINSON Y M. T. TANTON. 1991. The conservation of Leadbeater's possum, *Gymnobelideus leadbeateri* (McCoy): a case study of the use of bioclimatic modeling. *Journal of Biogeography* 18: 371-383.
- NIX, H. A. 1986. A biogeographic analysis of the Australian elapid snakes. In: R. Longmore (ed.) *Atlas of elapid snakes*. Australian Flora and Fauna Series No. 7, pp. 4-15.
- PEARSON, R. G. Y 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.
- PETERSON, A. T. 2001. Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling. *The Condor* 103: 599-605.
- PETERSON, A. T., S. L. EGBERT, V. SÁNCHEZ-CORDERO Y K. P. PRICE. 2000. Geographic analysis of conservation priorities using distributional modeling and complementarity: endemic birds and mammals in Veracruz, Mexico. *Biological Conservation* 93: 85-94.
- PETERSON, A. T. Y D. A. VIEGLAIS. 2001. Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem. *BioScience* 51: 363-371.
- RAPOPORT, E. H. 1982. *Areography. Geographical strategies of species*. Pergamon, Oxford.
- REJMÁNEK, M. 1996. Species richness and resistance to invasions. In: G. H. Orians, R. Dirzo y J. H. Cushman (eds.) *Biodiversity and ecosystem processes in tropical forests*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 153-172.
- SÁNCHEZ-CORDERO, V., A. T. PETERSON Y P. ESCALANTE-PLIEGO. 2001. El modelado de la distribución de especies y la conservación de la diversidad biológica. In: H. M. Hernández, A. N. García A., F. Álvarez y M. Ulloa (comps.) *Enfoques contemporáneos para el estudio de la biodiversidad*. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., pp. 359-379.

- SCOTT, J. M. Y B. CSUTI. 1997. Gap analysis for biodiversity survey and maintenance. In: M. L. Reaka-Kudla, D. E. Wilson y E. O. Wilson (eds.) *Biodiversity II. Understanding and protecting our biological resources*. Joseph Henry, Washington, D. C., pp. 321-340.
- SKOV, F. 2000. Potential plant distribution mapping based on climatic similarity. *Taxon* 49: 503-515.
- STROTHER, J. L. 1991. Taxonomy of *Complaya*, *Elaphandra*, *Iogeton*, *Jefea*, *Wamalchitamia*, *Wedelia*, *Zexmenia*, and *Zyzyxia* (Compositae-Heliantheae-Ecliptinae). *Systematic Botany Monographs* 33: 1-111.
- TÉLLEZ V., O. Y P. DÁVILA A. 2003. Protected areas and climatic change: a case study of the cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, Mexico. *Conservation Biology* 17: 846-853.
- VILLASEÑOR, J. L. 2003. Diversidad y distribución de las Magnoliophyta de México. *Interciencia* 28: 160-167.

Recibido: 9.ii.2004

Aceptado: 3.xi.2004