



Conservación

Dominios climáticos de la Sierra Madre Oriental y su relación con la diversidad florística

Climatic domains of the Sierra Madre Oriental and its relationship to floristic diversity

Mario Ernesto Suárez-Mota^{a,b,*}, José Luis Villaseñor^c y Lauro López-Mata^a

^a Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos, Carretera México-Texcoco, km 36.5, Montecillos, 56230, Texcoco, Estado de México, México

^b Universidad de la Sierra Juárez, Avenida Universidad s/n, Barrio la Asunción, 68725, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México

^c Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado postal 70-367, 04510, Ciudad de México, México

Recibido el 26 de febrero de 2016; aceptado el 13 de septiembre de 2016

Disponible en Internet el 23 de febrero de 2017

Resumen

La Sierra Madre Oriental ha perdido hasta el 30% de su vegetación, lo que hace imperativo conocer mejor su biodiversidad, así como las variables ambientales que explican su distribución. En la Sierra Madre Oriental es posible diferenciar 4 regiones climáticas, pero nunca se ha evaluado su relación con la biodiversidad. Se propone una evaluación con base en los dominios climáticos que la caracterizan y analizar su relación con la diversidad florística, representada por la familia Asteraceae. Se definieron dominios mediante análisis multivariados, utilizando datos de 19 parámetros climáticos con el paquete ANUCLIM, a 1 km². A partir de una clasificación no jerárquica, se hizo posteriormente una reclasificación jerárquica empleando la métrica de Gower y un agrupamiento utilizando el método UPGMA. Se reconocen 277 dominios climáticos en la Sierra Madre Oriental, los cuales se emplearon para explicar sus relaciones con la vegetación y para estimar la riqueza de Asteraceae en dichos dominios. El bosque templado es el bioma con mayor riqueza de especies y tiene una alta correlación geográfica con uno de los dominios climáticos obtenidos. Los resultados permiten aportar información que seguramente será de utilidad para definir futuras acciones de conservación de la biodiversidad en la región.

© 2017 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Palabras clave: Endemismo; Asteraceae; Riqueza florística; Análisis multivariados

Abstract

The Sierra Madre Oriental has lost about 30% of its natural habitat; for this reason, we considered imperative to know better its biodiversity and those environmental variables that account for its distribution. It is possible to identify 4 climatic regions in the Sierra Madre Oriental, but we do not know their relationships with the biodiversity. We propose to evaluate its climatic variability in order to determine the climatic domains characterizing its territory and their relationships with the floristic richness represented by the family Asteraceae. The definition of climatic domains was through multivariate analyses, using climatic data obtained from estimates of 19 climatic parameters obtained from the WorldClim database analyzed with the ANUCLIM software to 1 km² resolution. After an initial non-hierarchical classification, a hierarchical re-classification was made using the Gower's metrics and a clustering method (UPGMA); 277 climatic domains were identified along the Sierra Madre Oriental. They were later used to explain their relationships with the main biomes found in the mountain chain, as well as to determine the richness (alpha) in each of these climatic domains. Temperate forest is the biome with the greatest wealth of 29 species and has a high geographical correlation with one of the climatic domains obtained. We hope with this study to contribute with information useful to support the biodiversity conservation efforts carried out actually in the region.

© 2017 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Keywords: Endemism; Asteraceae; Floristic richness; Multivariate analysis

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: mesuarez@unsij.edu.mx (M.E. Suárez-Mota).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Introducción

El conocimiento de la distribución de especies y la riqueza circunscrita en diversas regiones geográficas facilitan la identificación de centros de biodiversidad (hot spots), así como las áreas prioritarias de conservación (Barthlott, Mutke, Rafiqpoor, Kier y Kreft, 2005; Kress et al., 1998; Williams, Prance, Humphries y Edwards, 1996). En México existe un gran número de especies endémicas (véase por ejemplo, Villaseñor, 2016), lo que ha conducido a considerarlas como prioritarias en las estrategias de conservación biológica (Arriaga et al., 2000).

Los inventarios de biodiversidad en diferentes biomas de México son aún incompletos, lo cual limita el conocimiento biogeográfico de las especies que los componen. Como alternativa a los análisis basados en los inventarios de la riqueza de especies, los patrones de distribución también se pueden evaluar mediante la superposición de mapas de distribución geográfica de las especies (Raedig, Dormann, Hildebrandt y Lautenbach, 2010). Existen diferentes métodos para analizar los patrones de distribución y de estimación de la riqueza de especies (Raedig et al., 2010); algunos, como los estimadores desarrollados por Chao (1984), se basan en la abundancia o en la incidencia de las especies (Chao, 2005; Colwell y Coddington, 1994); otros, como los estimadores de tipo Jackknife y bootstrap (Palmer, 1990), consideran la importancia de las especies endémicas en el reconocimiento de sitios prioritarios de conservación debido a la alta vulnerabilidad que presentan a la extinción (Gentry, 1986; Knapp, 2002). Todos ellos indudablemente facilitan la identificación de áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad.

La distribución de la biodiversidad con frecuencia varía dentro de sitios a escala local, entre lugares de una región (mesoescala) o entre regiones a escala global (Menge y Olson, 1990). Se ha sugerido que la variabilidad climática promueve la diversidad biológica, por lo que los factores climáticos se consideran importantes cuando se intenta explicar la variabilidad de la distribución de la biodiversidad en las escalas mencionadas y en la organización de las comunidades (Bowman, Mueller y McGinnies, 1985; Daubenmire, 1979; González-Medrano, 1996; Miles, 1981; Nix, 1986; Nobel, 1994). En el caso de las plantas, también se ha considerado que los factores edáficos tienen relevancia, debido a que intervienen en su desarrollo y crecimiento (Abd El-Ghani, 2000; Rzedowski, 1965; Sharaf y Shaltout, 1985; Yoder y Nowak, 2000); sin embargo, los datos edafológicos no se encuentran fácilmente disponibles para utilizarlos en análisis biogeográficos, en tanto que los datos climáticos se han empleado con mayor frecuencia debido su disponibilidad (por ejemplo, Worldclim [<http://www.worldclim.org/>] y Uniatmos [<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/indice.html>]). Estos datos se han empleado para formar unidades geográficas con alta similitud climática, definidas como dominios climáticos (Londoño-Murcia, Téllez-Valdés y Sánchez-Cordero, 2010; Mackey, Berry y Brown, 2008; Morgan, 2007; Suárez-Mota, Téllez-Valdés y Martínez-Meyer, 2014).

La Sierra Madre Oriental (SMO) (fig. 1) es una cadena montañosa muy importante, considerada una unidad biótica en diferentes propuestas de regionalización (Arriaga et al., 2000; Rzedowski, 1973, 1978). En ella se distribuyen diferentes biomas, que a su vez albergan una alta diversidad biológica; por

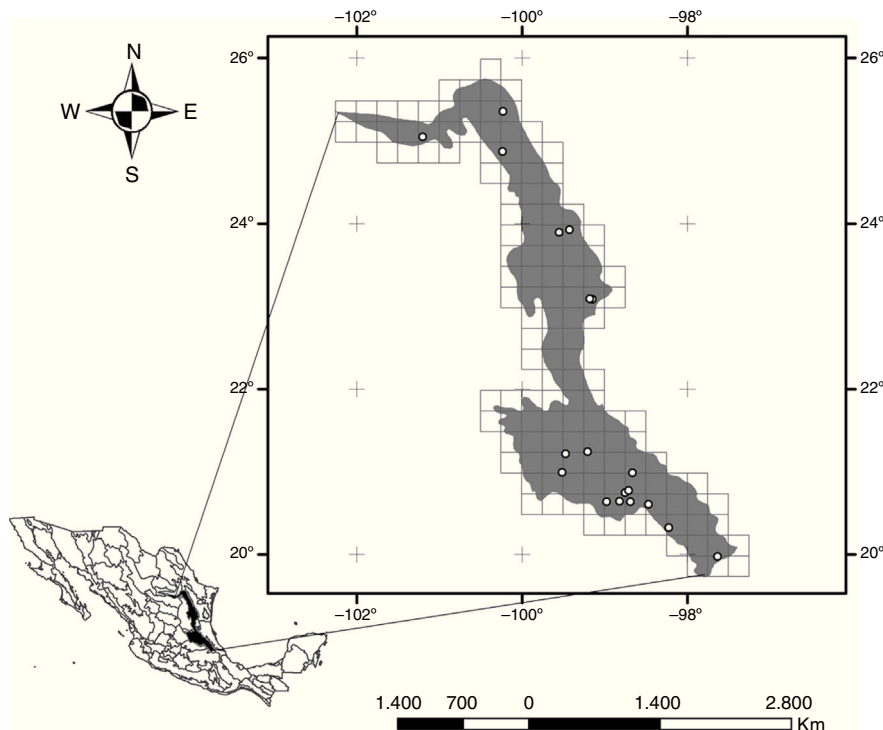


Figura 1. División de México en provincias geomorfológicas. El polígono gris corresponde a la Sierra Madre Oriental subdividida en celdas de 15 min de latitud y longitud. Los puntos blancos indican los sitios donde se han realizado inventarios florísticos.

ejemplo, su riqueza florística se ha estimado en poco más de 6,600 especies nativas (Villaseñor, 2016). De esta riqueza florística, el 13.5% está representada por miembros de la familia Asteraceae, considerada un buen subrogado de la biodiversidad, debido a su alta y significativa relación positiva entre sus especies y los otros componentes de la flora de diferentes regiones de México. En muchos sitios la familia representa con frecuencia el 10% o más de la riqueza florística (Villaseñor, Maeda, Rosell y Ortiz, 2007).

Los biomas de la SMO se distribuyen en condiciones climáticas contrastantes (por ejemplo, bosques templados o matorrales xerófilos) y de desigual extensión. El matorral xerófilo es el de mayor amplitud, mientras que el bosque húmedo de montaña registra la menor extensión en la SMO. La distribución y extensión de los biomas se ha delimitado con base en su estructura vegetal y hasta la fecha no se ha documentado cuáles son los factores climáticos que diferencian los biomas distribuidos en la SMO. El clima es considerado como un sustituto de la biodiversidad (Londoño-Murcia et al., 2010; Mackey et al., 2008; Morgan, 2007; Suárez-Mota et al., 2014), por lo que probablemente los biomas de la SMO muestren una alta correlación con los dominios climáticos que la componen. Es decir, si son geográficamente equivalentes, los dominios podrían emplearse para determinar los límites geográficos de los biomas de la SMO. Con base en esta hipótesis, los objetivos del presente trabajo fueron identificar las relaciones entre los biomas y los factores del clima, así como estimar la riqueza de especies en cada uno de ellos (biomas y dominios climáticos).

La estrategia es hacer una evaluación de la variabilidad climática de la SMO, a fin de definir los dominios climáticos que la caracterizan y analizar su relación con la diversidad florística representada por la familia Asteraceae en los biomas que ahí se encuentran. La pregunta a contestar es si la variabilidad climática de la SMO explica los patrones de diversidad y endemismo encontrados a lo largo de su territorio. Para esto se planteó una metodología de análisis basada en una clasificación climática, mediante análisis multivariados, utilizando datos obtenidos de las estimaciones de 19 parámetros climáticos a una resolución de 1 km². Los dominios climáticos obtenidos se emplearon para explicar sus relaciones con los biomas. Las especies de la familia Asteraceae se emplearon para estimar la riqueza florística total, siguiendo 2 estrategias, la primera con la diversidad total y la segunda con el endemismo.

Materiales y métodos

El polígono de la SMO seleccionado para este estudio corresponde al de las provincias geomorfológicas de México reconocidas por la Conabio (1997). Con un sistema de información geográfica (SIG; ArcGIS 10.0) se estimó la longitud de la SMO (aproximadamente 720 km), con una amplitud de aproximadamente 160 km en su parte más ancha (a los 21° N) y con una altitud promedio de 2,000 m snm. La SMO se ubica entre los 19° 44' 09" y 25° 44' 44" de latitud norte y los 97° 23' 50" y 102° 15' 15" de longitud oeste (fig. 1) y se dividió en 140 unidades geográficas operativas (UGO's) de 15 min de latitud y longitud. Tal escala representó el mejor compromiso entre la presencia de

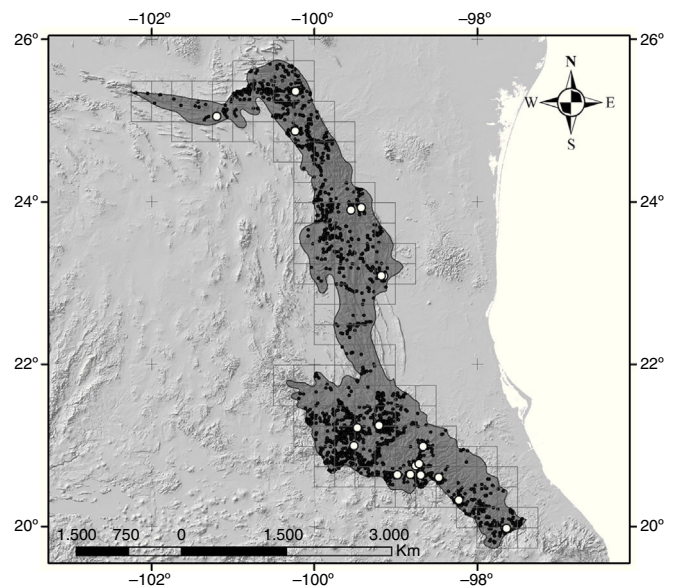


Figura 2. Distribución geográfica de las Asteraceae en la Sierra Madre Oriental y los inventarios florísticos (puntos blancos) que allí se han realizado.

localidades de recolección y los vacíos en dicho esfuerzo. Es decir, a escala más fina el número de celdas sin registros era mayor que el de los que sí los registraban.

La lista de especies de la familia Asteraceae se obtuvo principalmente de la revisión de especímenes depositados en el Herbario Nacional (MEXU) del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), complementada con el estudio de especímenes adicionales resguardados en otras colecciones biológicas nacionales y del extranjero. La mayoría de los especímenes estudiados están disponibles en línea en las páginas de la REMIB (Conabio) y del Instituto de Biología (UNIBIO, UNAM). A partir de la información contenida en las etiquetas de los ejemplares, se obtuvieron las coordenadas geográficas de los sitios en que fueron recolectados. Esta información permitió la generación de una base de datos que se empleó para analizar su distribución geográfica y su relación con los dominios climáticos y los biomas que se distribuyen en la SMO. Con estos datos se elaboró un mapa que muestra los puntos de ocurrencia de las especies seleccionadas sobre el mapa de la SMO dividido en UGO's (fig. 2).

La generación de los dominios climáticos en la SMO se realizó siguiendo el proceso de clasificación climática empleado en trabajos previos (Cuervo-Robayo et al., 2013; Leathwick, Overton y Mcleod, 2003; Londoño-Murcia et al., 2010; Morgan, 2007; Suárez-Mota et al., 2014). Se emplearon las capas de los 19 parámetros climáticos propuestos por Cuervo-Robayo et al. (2013) a una resolución de 1 km². Las coberturas digitales de 3 aspectos de terreno (orientación, pendiente y altitud) considerados entre los principales que propician la variación climática en la SMO fueron también utilizados (tabla 1). La información se analizó en el SIG ArcGIS 10.0 (Esri, 2010).

Para realizar el proceso de clasificación (regionalización climática), se interpolaron los valores de las 22 capas seleccionadas, utilizando un modelo digital de elevación (Inegi, 1997) y el algoritmo «Thin plate smoothing splines», implementado

Tabla 1

Parámetros climáticos usados para generar la clasificación de la Sierra Madre Oriental en dominios y regiones climáticas.

1. Temperatura promedio anual
2. Oscilación diurna de la temperatura
3. Isotermalidad
4. Estacionalidad de la temperatura estacional
5. Temperatura máxima del periodo más cálido
6. Temperatura mínima del periodo más frío
7. Oscilación anual de la temperatura
8. Temperatura promedio del trimestre más húmedo
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 húmedo
14. Precipitación del periodo más seco
15. Estacionalidad de la precipitación
16. Precipitación del trimestre más húmedo
17. Precipitación del trimestre más seco
18. Precipitación del trimestre más cálido
19. Precipitación del trimestre más frío
20. Altitud m snm
21. Orientación
22. Pendiente

Fuente: [Cuervo-Robayo et al., 2013](#).

en el paquete ANUCLIM 6.1 ([Houlder et al., 2000](#); [Hutchinson, Nix, McMahon y Ord, 1995](#); [Xu y Hutchinson, 2011, 2013](#)). De esta manera, se obtuvieron los valores promedio mensuales de las 19 variables del clima y las 3 de terreno que se encuentran en cada celda de la SMO a escala de 1 km² con las altitudes correspondientes al modelo digital de elevación. Con esos valores se llevaron a cabo los análisis multivariados para definir grupos de celdas que por su similitud ambiental permitieran definir una regionalización climática de la SMO. En este trabajo, la clasificación de dichos valores ambientales se definió como la regionalización climática, ya que las variables empleadas (19) en su mayoría corresponden a datos de clima.

Los dominios climáticos en la SMO se definieron a través de una clasificación obtenida de un análisis multivariado derivado del conjunto de datos ambientales considerados. Inicialmente se realizó una clasificación no jerárquica y posteriormente una reclasificación jerárquica; en ambos casos, para la transformación de los datos en las matrices se utilizó la métrica de distancias de Gower ([Gower, 1971](#); [Londoño-Murcia et al., 2010](#); [Suárez-Mota et al., 2014](#)). La clasificación final se hizo mediante un agrupamiento promedio no ponderado (UPGMA por sus siglas en inglés).

Los valores en celdas de las 22 coberturas digitales fueron usados para construir una matriz de datos en la que se ordenaron las 76,729 celdas en filas y los valores de los 22 parámetros ambientales en columnas. Debido a que el número de datos de la matriz es muy grande, la clasificación multivariada constó de 2 etapas; la primera consistió en una clasificación no-jerárquica, empleando el algoritmo Allocation Methods for Clustering Large Sets of Data (ALOC), que ha mostrado ser muy eficiente, incluso para análisis de millones de datos, integrado en el programa PATN ([Belbin, 1987](#); [Londoño-Murcia et al., 2010](#);

[Suárez-Mota et al., 2014](#)). El número de grupos que se forman en esta etapa se definen con otro algoritmo implementado en PATN, determinando el número de grupos como resultado de la raíz cuadrada del número de variables (celdas) que analiza. Debido a que se trata de una clasificación no jerárquica, con un amplio número de datos, no es posible generar un dendrograma de agrupamiento. Como resultado, PATN en esta clasificación no jerárquica produce 2 archivos; el primero (denominado row group composition o rgc), permite distinguir a qué grupo fueron asignadas las celdas y así reconocer el dominio al que pertenecen. Posteriormente, este mismo archivo puede ser convertido en otro archivo tipo raster (ARC/INFO ASCII GRID) para desplegar en un mapa la distribución geográfica de los dominios formados ([Belbin, 1987](#)).

El segundo archivo (denominado row group statistics o rgs), contiene un perfil resumido de las características ambientales de cada dominio (valores mínimos, primer cuartil, mediana, promedio, tercer cuartil y valores máximos). Con este archivo se estructura una nueva matriz con los grupos formados (filas) y sus valores estadísticos resumidos (columnas). Esta nueva matriz permite ahora hacer una clasificación jerárquica que resulta en un dendrograma, el cual muestra los dominios agrupados de acuerdo con su semejanza climática ([Belbin, 1989](#)). El número de grupos formados puede ajustarse a diferentes valores de similitud, dependiendo de los objetivos del estudio. En este trabajo se consideró que la clasificación buscara una congruencia con los biomas reconocidos en la SMO. Para lo cual se utilizó la clasificación de los tipos de vegetación concentrada en biomas, propuesta por [Suárez-Mota y Villaseñor \(2011\)](#) y [Villaseñor y Ortiz \(2014\)](#). En dichos trabajos los bosques mesófilos de montaña se incluyen dentro del bioma bosque húmedo de montaña. Los 5 dominios (equivalente a 5 biomas) definidos en el análisis se superpusieron con el mapa de biomas, con la finalidad de estimar su correspondencia (sobreposición) geográfica y de esta manera evaluar la posibilidad de emplearlos como sustitutos de la biodiversidad.

El mapa que muestra la distribución de las recolectas de especies de Asteraceae en la SMO se superpuso a la división en dominios climáticos. Con esta sobreposición de mapas se obtuvieron datos de incidencia de especies por UGO, es decir, número de registros de cada especie en cada UGO. De forma similar se generó otra matriz, en la que se emplearon los dominios climáticos definidos para la SMO.

En diversos estudios se han evaluado los algoritmos empleados para la estimación de riqueza de especies mediante curvas de acumulación ([Chazdon, Colwell, Denslow y Guariguata, 1998](#); [Gimaret-Carpentier, Pélissier, Pascal y Houllier, 1998](#); [Longino, Coddington y Colwell, 2002](#); [Skov y Lawesson, 2000](#)). La evaluación del sesgo y la exactitud de los estimadores de riqueza han sido reportadas para datos reales de distintos grupos biológicos ([Brose, 2002](#); [Chiarucci, Enright, Perry, Miller y Lamont, 2003](#); [Coddington, Young y Coyle, 1996](#); [Hellmann y Fowler, 1999](#); [Palmer, 1990, 1991](#); [Villaseñor, Maeda, Colín-López y Ortiz, 2005](#); [Walther y Morand, 1998](#)). A partir de tales resultados, se estimó la riqueza y evaluó el sesgo de recolecta utilizando el estimador no paramétrico Jackknife, que toma en cuenta fundamentalmente el número de especies presentes en solo una unidad

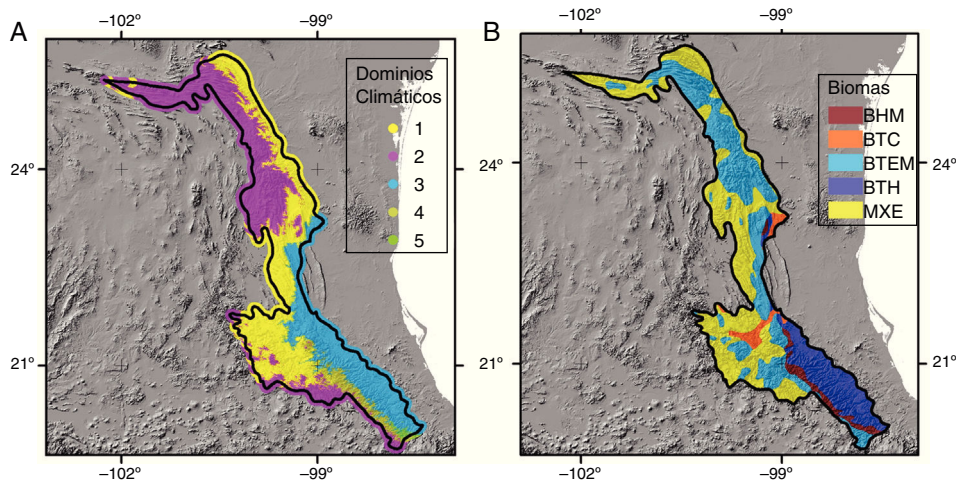


Figura 3. A) Distribución geográfica de las 5 regiones climáticas de la Sierra Madre Oriental; B) distribución de los 5 biomas que la caracterizan. BHM: bosque húmedo de montaña; BTC: bosque tropical estacionalmente seco; BTEM: bosque templado; BTH: bosque tropical húmedo; MXE: matorral xerófilo.

de muestreo (González-Oreja, de la Fuente-Díaz, Hernández-Santín, Buzo-Franco y Bonache-Regidor, 2010). Para ello se utilizó el paquete «sprich», implementado en R, que se ajusta por el esfuerzo heterogéneo de muestreo (Raedig et al., 2010). El uso de este script deriva en 4 valoraciones: 1) riqueza estimada con respecto al total de especies seleccionadas (áreas de riqueza), 2) misma estimación, pero con las especies endémicas (áreas de endemismo), 3) valores equivalentes, pero usando los dominios climáticos (riqueza climática) y 4) combinando el conjunto de todas las especies y los dominios climáticos. Empleamos el método de interpolación geométrica, aplicando un esquema de suma de distancia ponderada inversa, derivada de los mapas de riqueza de especies y del endemismo presentes en la SMO (Raedig et al., 2010).

Resultados

La revisión de ejemplares de herbario permitió generar una lista de 757 especies pertenecientes a la familia Asteraceae aunque no se contó con registros para unas 150 especies reportadas para la sierra. La cifra de especies evaluadas representa el 11.6% del total de las 6,600 especies registradas en la SMO (Villaseñor, 2016). De esta lista de 757 especies, 427 (56.7%) de ellas son endémicas de México. Utilizando la información reportada en diferentes inventarios florísticos realizados en la SMO, dicha correlación (Asteraceae-total de especies) es positiva y altamente significativa ($r=0.89$) (fig. 2). Se encontró que 204 (26.9%) especies restringen su distribución a una sola de las 140 UGO en que se dividió la SMO. La especie con la distribución más amplia es *Roldana aschenborniana*, registrada en 40 UGO.

La SMO muestra una alta heterogeneidad climática, definida por 277 dominios climáticos obtenidos en este estudio. Estos dominios representan el número máximo de agrupamientos de celdas que muestran mayor similitud climática en común y reflejan su homogeneidad ambiental con respecto a las demás celdas. Tales dominios se reclasificaron jerárquicamente, empleando la métrica de Gower y el método de UPGMA para definir

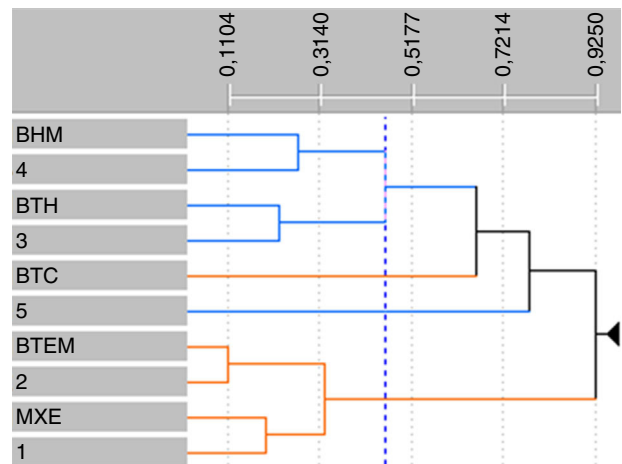


Figura 4. Similitud florística entre las regiones climáticas y los biomas registrados en la Sierra Madre Oriental.

5 regiones climáticas, que corresponden al mismo número de biomas, los cuales fueron empleados para generar un mapa al que se sobrepuso el mapa de registros de las especies con el que se obtuvieron sus valores de similitud (figs. 3 y 4). Se encontró que en una sola región (2) se distribuyen 631 (83%) de las especies analizadas; en el extremo opuesto, la región climática menos diversa (región 5) solamente registra 34 especies (tabla 2). La distribución de las especies en las 5 regiones climáticas es variable, seguramente en respuesta a su heterogeneidad ambiental.

Tabla 2

Riqueza de especies registrada en las regiones climáticas obtenidas a partir de los dominios climáticos de la Sierra Madre Oriental.

Región climática	Total de especies	Endémicas de México	Superficie (%)
1	435	71	33.59
2	631	259	39.33
3	154	8	20.84
4	145	10	5.64
5	34	1	0.60

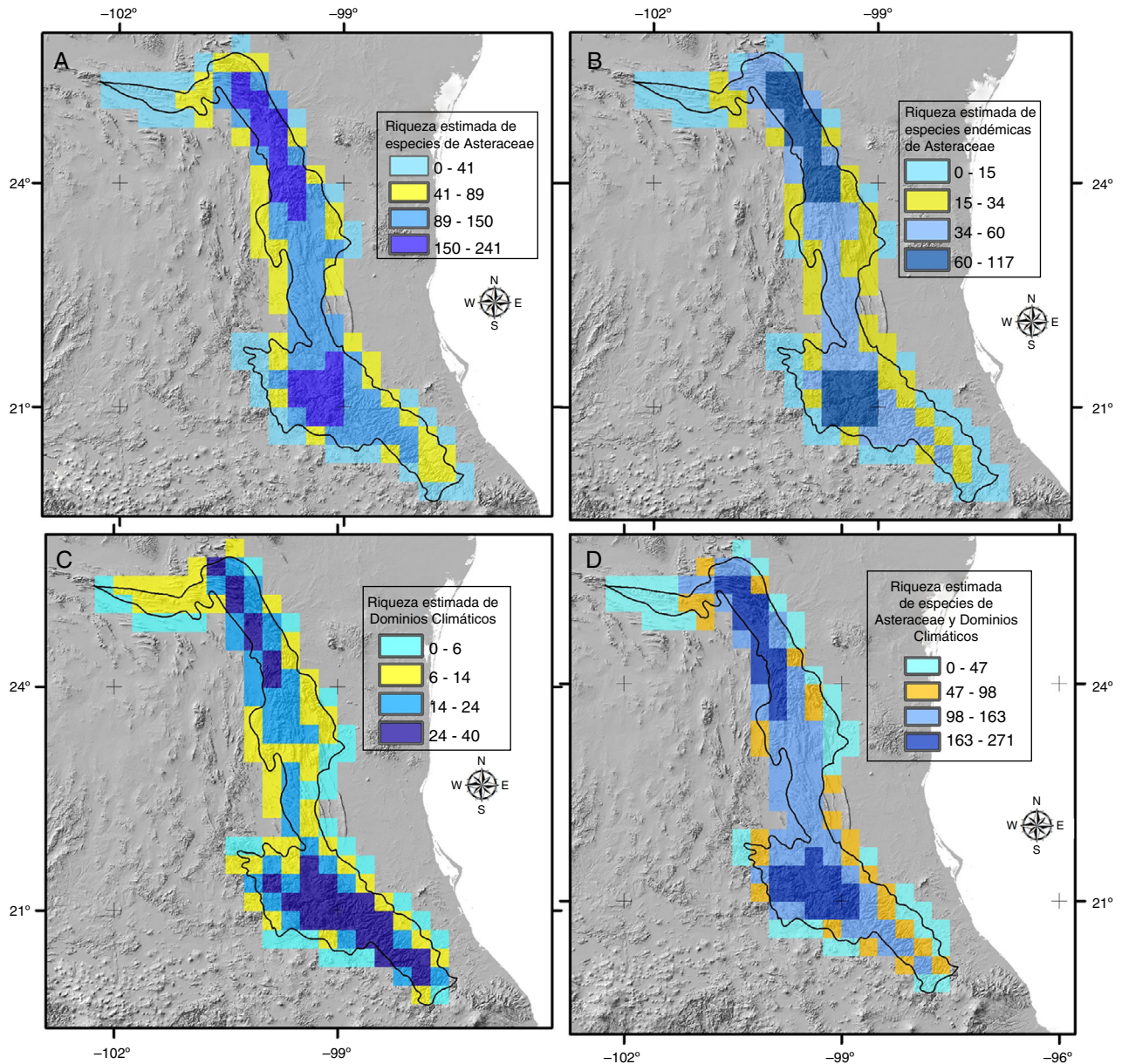


Figura 5. Distribución de la riqueza estimada con total de especies (A), especies endémicas (B), dominios climáticos (C) y riqueza florística y climática (D).

Sin embargo, las especies compartidas indican que las regiones 1 y 2 muestran la mayor similitud florística, lo que sugiere que comparten también condiciones climáticas similares (fig. 4).

Los matorrales xerófilos constituyen el bioma de la SMO con mayor amplitud geográfica (el 41.3% del territorio); allí se registran 531 especies, 111 de ellas solamente conocidas en este bioma (tabla 3). En segundo lugar, se encuentran los bosques templados, que ocupan el 36.1% del territorio de la SMO y que contienen una riqueza de 592 especies, 150 de ellas registradas únicamente en este bioma.

Las áreas ocupadas por los biomas tienen una alta correspondencia geográfica con las regiones climáticas, como lo sugieren los valores de similitud entre ellos (figs. 3 y 4). Dicha similitud permite suponer que los biomas pueden ser circunscritos en las áreas que ocupan las regiones climáticas, donde se encuentran las condiciones ambientales idóneas para

las especies analizadas. La correspondencia fue adicionalmente evaluada llevando a cabo un análisis de similitud florística entre los biomas y los dominios, empleando la misma estrategia multivariada, mediante las distancias de la métrica de Gower, reflejándoles con el método UPGMA. El dendrograma obtenido señala los agrupamientos formados por la riqueza florística que existe tanto en los biomas como en los dominios (fig. 4).

La estimación de la riqueza de Asteraceae en la SMO revela que en los bosques templados y la región climática 2 se encuentran los valores más altos, tanto para la riqueza total como para el endemismo (fig. 5A y 5B). El Bosque húmedo de montaña y la región climática 4 también tienen un alto solapamiento, lo cual se refleja en su nivel de similitud florística (figs. 3 y 4). Se observa igualmente un importante solapamiento entre ellos, compartiendo ambos casos sitios con diversidad florística y variabilidad climática equivalente (fig. 5C y 5D). La

Tabla 3
Riqueza de especies registrada en los 5 principales biomas de la Sierra Madre Oriental.

Bioma	Total de especies	Especies endémicas	Superficie (km ²)	Superficie (%)
Bosque húmedo de montaña	141	14	2,238.98	3.7
Bosque tropical estacionalmente seco	74	3	2,047.33	3.4
Bosque templado	592	150	21,713	36.1
Bosque tropical húmedo	148	14	9,362.82	15.6
Matorral xerófilo	531	111	24,845.66	41.3

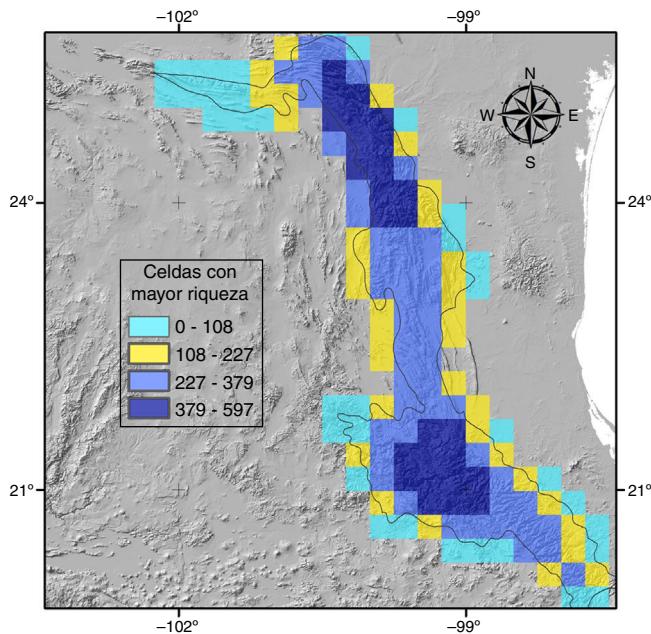


Figura 6. Sitios donde se encuentra la mayor riqueza estimada de la diversidad florística y la heterogeneidad climática de la Sierra Madre Oriental.

sobreposición de los mapas obtenidos con las estimaciones de riqueza permiten identificar las celdas que registran la mayor diversidad florística y climática detectada en la SMO (fig. 6).

Discusión

La identificación de dominios ambientales ha demostrado ser una herramienta útil para regionalizar diferentes sectores del planeta (Londoño-Murcia et al., 2010; Mackey et al., 2008; Morgan, 2007; Suárez-Mota et al., 2014). A partir de los patrones revelados por una clasificación climática, se han propuesto regionalizaciones biofísicas, utilizando un conjunto de parámetros que caracterizan a los dominios climáticos de un área (Londoño-Murcia et al., 2010; Suárez-Mota et al., 2014). Este estudio muestra la clasificación de los dominios climáticos anidados en 5 regiones, con una contrastante cobertura geográfica que permite su comparación con otras propuestas de regionalización para esta provincia geomorfológica de México (Luna, Morrone y Espinosa, 2004). La variabilidad climática observada en la SMO, reconocida en los 277 dominios identificados en la clasificación no jerárquica, permite evaluar su correspondencia con los tipos de vegetación o los biomas en que se incluyen, como en este estudio. Permite igualmente evaluar su relación

con la riqueza y el endemismo de la flora, representada por la familia Asteraceae, catalogada como un buen sustituto de la biodiversidad en México (Villaseñor, Ibarra-Manríquez, Meave y Ortiz, 2005).

La distribución y abundancia de las plantas están estrechamente relacionadas con factores ambientales (McAuliffe, 1994). Por ejemplo, la profundidad del suelo y la inclinación de las laderas influyen en el movimiento y capacidad de retención del agua y, en consecuencia, de su distribución espacial y disponibilidad temporal para las plantas (McAuliffe, 1994). Estos factores pueden verse modificados por otros, como altitud, latitud y longitud, variables directamente relacionadas con el clima; en consecuencia, la existencia de gradientes climáticos en la SMO se ve reflejada en los dominios y regiones climáticas que sintetizan su variabilidad climática (fig. 3). Cada una de las regiones comprende diferentes dominios; la más amplia y heterogénea es la región 2, en la que se distribuyen 97 dominios climáticos, mientras que en la región 5, que es la de menor extensión, se distinguen solamente 10 dominios (tabla 2).

En la SMO se han realizado esfuerzos por conocer mejor su biodiversidad y las condiciones climáticas que la caracterizan (Luna et al., 2004). Aunque actualmente se tienen inventarios florísticos para diferentes localidades (fig. 1), es evidente que la SMO sigue presentando muchos vacíos de información florística. Los resultados de este trabajo muestran las diversas condiciones climáticas a lo largo del área que ocupa la SMO. El agrupamiento de los 277 dominios identificados en 5 regiones climáticas permite a su vez la comparación con la riqueza florística encontrada en los 5 biomas reportados para la cadena montañosa. La congruencia entre ambos conjuntos de datos resalta la relevancia de la información climática como un subrogado de la diversidad florística.

Nix et al. (2000) mencionan que la variación ambiental promueve la variación biológica. En consecuencia, un mejor conocimiento de la variación climática en una región puede apoyar la selección de áreas con distintos atributos ambientales y diferentes patrones de riqueza biológica, algunos de ellos mostrando inclusive elementos biológicos adaptados a ellos, como serían los endemismos (Mackey et al., 2008). En el caso de la SMO, a partir de los resultados obtenidos se apoya esta idea, considerando que la región 2 es la que tiene mayor heterogeneidad climática y en la que se encuentra el mayor número de endemismos y alta riqueza de especies. Algunos autores han sugerido que los dominios climáticos son buenos sustitutos (ambientales) de la biodiversidad, porque incluyen propiedades ecológicamente significativas (Londoño-Murcia et al., 2010; Mackey et al., 2008; Morgan, 2007; Suárez-Mota et al., 2014). Los resultados

obtenidos en este trabajo apoyan tales ideas, pues los sitios donde se distribuye la mayor diversidad florística, tanto por su riqueza como por su componente endémico, coinciden de manera importante con los resultados de la división climática de la SMO. Algo importante de destacar, tal y como sugieren Mackey et al. (2008), es la importante relación entre los endemismos y su adaptación a los diferentes climas que se distribuyen en la SMO. Suárez-Mota et al. (2014) encontraron resultados similares, al señalar que los sitios con mayor heterogeneidad ambiental coinciden con sitios de mayor riqueza florística en la Faja Volcánica Transmexicana. Al parecer, al menos para México este patrón de coincidencia geográfica entre climas y diversidad florística está siendo apoyado con los resultados de este estudio (fig. 6) y con los resultados obtenidos por otros autores, como los citados líneas antes.

La SMO es una provincia con una alta diversidad florística, representada por más de 6,600 especies nativas de plantas vasculares (Villaseñor, 2016). Un alto porcentaje de ellas pertenecen a la familia Asteraceae. La preponderancia de miembros de la familia en la flora de la SMO y su correlación altamente significativa con la riqueza representada por las otras familias (tabla 2, fig. 2), apoyan la propuesta de que la familia es un buen subrogado de la riqueza florística (Villaseñor et al., 2005a,b). Del mismo modo, la alta correspondencia geográfica entre las especies de Asteraceae y los dominios climáticos (fig. 4), plasmados en los niveles de similitud encontrados, apoyan dicho argumento de la riqueza florística de esta importante cadena montañosa. En consecuencia, los patrones de distribución de la familia Asteraceae encontrados en este estudio, seguramente son un reflejo de los patrones a observar cuando se evalúe toda su riqueza florística. Ejercicios similares podrían realizarse en otras provincias o regiones del país para determinar, de manera más concluyente, si los patrones entre la riqueza florística y la variabilidad climática constituyen un patrón generalizado a nivel nacional.

La congruencia geográfica observada entre la riqueza florística y la variabilidad climática en la SMO es geográficamente alta (figs. 5 y 6). La región climática 2, que concentra la mayor cantidad de dominios (97), también concentra el mayor porcentaje (83%) de las especies utilizadas para este análisis (tabla 2). Las otras regiones con menor variación climática y menor extensión registran también menor cantidad de especies. Por lo tanto, como lo afirman Nix et al. (2000), es de esperar que a menor variación climática se tenga menor riqueza de especies. Las regiones con mayor heterogeneidad climática muestran una mayor similitud florística (fig. 4). El uso más frecuente de la variabilidad climática, para estimar patrones de diversidad florística, sin lugar a dudas redituará en información interesante para avanzar hacia un mejor conocimiento de nuestra rica biodiversidad nacional.

La distribución de especies en la SMO es heterogénea; la mayor riqueza se concentra en el bosque templado y el matorral xerófilo (tablas 2 y 3). La diferencia florística entre los biomas puede explicarse por su importante correlación con la variabilidad climática, explicada en parte por la correspondencia geográfica encontrada con los dominios climáticos (fig. 4).

La clasificación climática ha permitido reconocer parte de las condiciones ambientales que definen cada bioma. Se considera que las áreas que ocupan los biomas, como ha sido propuesto por

Villaseñor y Ortiz (2014) a partir de una agrupación de los tipos de vegetación (por ejemplo, como los definidos por Rzedowski, 1978), tienen una alta correspondencia geográfica con los dominios climáticos. De esta manera, la información perdida por los cambios frecuentes en el uso de suelo que han reducido sustancialmente las áreas con vegetación original, podría ser subsanada utilizando los dominios climáticos como fuente de información de áreas alteradas ecológicamente.

La riqueza observada en cualquier región, obtenida a partir de diversos muestreos, es una subestimación de la riqueza verdadera, debido a que generalmente hay especies que no se incluyen en los inventarios (López-Gómez y Williams-Linera, 2006). Por otra parte, los insuficientes inventarios, como ocurre en la SMO, revelan la urgencia por contar con un mejor conocimiento de su riqueza florística (fig. 1). Por tal motivo, la estimación de su riqueza empleando algoritmos que permitan hacer dichas estimaciones es una alternativa temporal para avanzar hacia un mejor conocimiento de la biodiversidad de regiones tan importantes como lo es la SMO (fig. 6). Los resultados de la riqueza estimada con la diversidad florística tienen una alta correspondencia con la estimación de la riqueza del endemismo en la SMO, lo que sugiere que estos sitios deben ser considerados en futuros planes de conservación de la biodiversidad en esta cadena montañosa. Para poder subsanar vacíos de información de la biodiversidad en futuros planes de conservación, pueden emplearse los dominios climáticos como sustitutos, como lo sugiere su alta correspondencia geográfica con la riqueza florística en la SMO, patrón que podría ocurrir en otras regiones de México.

Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) la beca otorgada (163037) para realizar una estancia postdoctoral. La base de datos de Asteraceae analizada en este estudio fue generada en parte con apoyo económico de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) y del Instituto de Biología de la UNAM (Programa SIBA). Se agradece a Enrique Ortiz su apoyo en la estructura de la base de datos florísticos y en otros detalles técnicos de la investigación. Agradecemos también a los revisores anónimos sus comentarios y sugerencias.

Referencias

- Abd El-Ghani, M. M. (2000). Floristics and environmental relations in two extreme desert zones of western Egypt. *Global Ecology Biogeography*, 9, 499–516.
- Arriaga, L., Espinoza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L. y Loa, E. (Coord.) (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. México, D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Barthlott, W., Mutke, J., Rafiqpoor, M. D., Kier, G. y Kreft, H. (2005). Global centers of vascular plant diversity. *Nova Acta Leopoldina*, 92, 61–83.
- Belbin, L. (1987). The use of non-hierarchical allocation methods for clustering large sets of data. *Australian Computer Journal*, 19, 32–41.
- Belbin, L. (1989). PATN Technical Reference. POBox 84, Lyneham, ACT 2602, Australia.
- Bowman, R. A., Mueller, D. M. y McGinnies, W. J. (1985). Soil and vegetation relationships in a Central Plains saltgrass meadow. *Journal of Range Management*, 38, 325–328.

- Brose, U. (2002). Estimating species richness of pitfall catches by non-parametric estimators. *Pedobiologia*, *46*, 101–107.
- Chao, A. (1984). Non-parametric estimation of the number of classes in a population. *Scandinavian Journal of Statistics*, *11*, 265–270.
- Chao, A. (2005). Species richness estimation. En N. C. Balakrishnan, B. Read, y B. Vidakovic (Eds.), *Encyclopedia of statistical sciences* (pp. 7909–7916). New York: Wiley & Sons.
- Chazdon, R. L., Colwell, R. K., Denslow, J. S. y Guariguata, M. R. (1998). Statistical methods for estimating species richness of woody regeneration in primary and secondary rain forest of northeastern Costa Rica. En F. Dallmeier y J. A. Comiskey (Eds.), *Forest biodiversity research, monitoring and modeling* (pp. 285–309). Paris: The Parthenon Publishing Group.
- Chiarucci, A., Enright, N. J., Perry, G. L., Miller, B. P. y Lamont, B. B. (2003). Performance of nonparametric species richness estimators in a high diversity plant community. *Diversity and Distributions*, *9*, 283–295.
- Coddington, J. A., Young, L. H. y Coyle, F. A. (1996). Estimating spider species richness in a southern appalachian cove hardwood forest. *The Journal of Arachnology*, *24*, 111–128.
- Colwell, R. K. y Coddington, J. A. (1994). Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions of the Royal Society (Series B)*, *345*, 101–118.
- Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (1997). *Provincias biogeográficas de México*. Escala 1:4 000 000. México.
- Cuervo-Robayo, A., Téllez-Valdés, O., Gómez, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J. F. y Martínez-Meyer, E. (2013). An update of high-resolution monthly climate surfaces for México. *International Journal of Climatology*, *34*, 2427–2437.
- Daubenmire, R. F. (1979). *Ecología vegetal. Tratado de autoecología de plantas*. México D.F.: Noriega Limusa.
- Esri (Environmental Systems Research Institute). (2010). Maps throughout this book were created using Arc- GIS® software by Esri. ESRI, Redlands.
- Gentry, A. H. (1986). Endemism in tropical versus temperate plant communities. En M. E. Souleí (Ed.), *Conservation biology: the science of scarcity and diversity*. Sunderland: Sinauer Associates Inc.
- Gimaret-Carpentier, C., Péliissier, R., Pascal, J. P. y Houllier, F. (1998). Sampling strategies for the assessment of tree species diversity. *Journal of Vegetation Science*, *9*, 161–172.
- González-Medrano, F. (1996). Algunos aspectos de la evolución de la vegetación de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, *58*, 129–136.
- González-Oreja, J. A., de la Fuente-Díaz, A. A., Hernández-Santín, L., Buzo-Franco, D. y Bonache-Regidor, C. (2010). Evaluación de estimadores no paramétricos de la riqueza de especies. Un ejemplo con aves en áreas verdes de la ciudad de Puebla, México. *Animal Biodiversity and Conservation*, *33*, 31–45.
- Gower, J. C. (1971). A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics*, *27*, 857–871.
- Hellmann, J. J. y Fowler, G. W. (1999). Bias, precision, and accuracy of four measures of species richness. *Ecological Applications*, *9*, 824–834.
- Houlder, D. J., Hutchinson, M. F., Nix, H. A. y McMahon, J. P. (2000). *ANU-CLIM 5.1. User guide*. Canberra: Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University.
- Hutchinson, M. F., Nix, H. A., McMahon, J. P. y Ord, K. D. (1995). *Africa-a topographic and climatic database, Version 1.0*. Canberra: Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (1997). *Modelo digital del terreno*, escala 1: 250,000. México, D. F.: Inegi.
- Knapp, S. (2002). Assessing patterns of plant endemism in Neotropical uplands. *Botanical Review*, *68*, 22–37.
- Kress, W. J., Heyer, W. R., Acevedo, P., Coddington, J., Cole, D., Erwin, T. L., et al. (1998). Amazonian biodiversity: assessing conservation priorities with taxonomic data. *Biodiversity and Conservation*, *7*, 1577–1587.
- Leathwick, J. R., Overton, J. M. y Mcleod, M. (2003). An environmental domain classification of New Zealand and its use as a tool for biodiversity management. *Conservation Biology*, *17*, 1612–1623.
- Londoño-Murcia, C., Téllez-Valdés, O. y Sánchez-Cordero, V. (2010). Environmental heterogeneity of World Wildlife Fund for Nature ecoregions and implications for conservation in Neotropical biodiversity hotspots. *Environmental Conservation*, *37*, 116–127.
- Longino, J., Coddington, J. A. y Colwell, R. K. (2002). The ant fauna of a tropical rain forest: estimating species richness in three different ways. *Ecology*, *83*, 689–702.
- López-Gómez, A. M. y Williams-Linera, G. (2006). Evaluación de métodos no paramétricos para la estimación de riqueza de especies de plantas leñosas en cafetales. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, *78*, 7–15.
- Luna, I., Morrone, J. J. y Espinosa, D. (Eds.). (2004). *Biodiversidad de la Sierra Madre Oriental*. México, D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mackey, B. G., Berry, S. L. y Brown, T. (2008). Reconciling approaches to biogeographical regionalization: a systematic and generic framework examined with a case study of the Australian continent. *Journal of Biogeography*, *35*, 213–229.
- McAuliffe, J. R. (1994). Landscape evolution, soil formation, and ecological patterns and processes in Sonoran Desert bajadas. *Ecological Monographs*, *64*, 111–148.
- Menge, B. A. y Olson, A. M. (1990). Role of scale and environmental factors in regulation of community structure. *Trends in Ecology & Evolution*, *5*, 52–57.
- Miles, J. (1981). Problems in heath wasteland and grassland dynamics. *Vegetation*, *46*, 61–74.
- Morgan, F. (2007). *Environmental domains of Antarctica*. Version 2. Antarctica New Zealand Conservation. Landcare New Zealand.
- Nix, H. A. (1986). A biogeographic analysis of Australian elapid snakes. En R. Longmore (Ed.), *Atlas of elapid snakes of Australia* (pp. 4–15). Canberra: Australian Government Publishing Service.
- Nix, H. A., Faith, D. P., Hutchinson, M. F., Margules, C. R., West, J., Allison, A. et al. (2000). *The BioRap Toolbox. A national study of biodiversity assessment and planning for Papua New Guinea*. Canberra, Australia: Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University.
- Nobel, P. S. (1994). *Remarkable agaves and cacti*. Nueva York: Oxford University Press.
- Palmer, M. (1990). The estimation of species richness by extrapolation. *Ecology*, *71*, 1195–1198.
- Palmer, M. (1991). Estimating species richness: the second order jackknife reconsidered. *Ecology*, *72*, 1512–1513.
- Raedig, C. C., Dormann, F., Hildebrandt, A. y Lautenbach, S. (2010). Reassessing Neotropical angiosperm distribution patterns based on monographic data: a geometric interpolation approach. *Biodiversity and Conservation*, *19*, 1523–1546.
- Rzedowski, J. (1965). Vegetación del estado de San Luis Potosí. *Acta Científica Potosina*, *5*, 5–291.
- Rzedowski, J. (1973). Geographical relationships of the flora of Mexican dry regions. En A. Graham (Ed.), *Vegetation and vegetational history of Northern Latin America* (pp. 61–72). Amsterdam: Elsevier Scientific Company.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. México D.F.: Editorial Limusa.
- Sharaf, E. D. A. y Shaltout, K. H. (1985). On the phytosociology of Wadi Arabia in the eastern desert of Egypt. *Proceedings of the Egyptian Botanical Society*, *4*, 1311–1325.
- Skov, F. y Lawesson, J. E. (2000). Estimation of plant species richness from systematically placed plots in a managed forest ecosystem. *Nordic Journal of Botany*, *20*, 477–483.
- Suárez-Mota, M. E., Téllez-Valdés, O. y Martínez-Meyer, E. (2014). Dominios climáticos del Eje Volcánico Transversal de México. *GeoFocus*, *14*, 120–143.
- Suárez-Mota, M. E. y Villaseñor, J. L. (2011). Las compuestas endémicas de Oaxaca, México: diversidad y distribución. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, *88*, 55–66.
- Villaseñor, J. L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *87*, 559–902.
- Villaseñor, J. L., Ibarra-Manríquez, G., Meave, J. A. y Ortiz, E. (2005). Higher taxa as surrogates of plant biodiversity in a megadiverse country. *Conservation Biology*, *19*, 232–238.
- Villaseñor, J. L., Maeda, P., Colín-López, J. J. y Ortiz, E. (2005). Estimación de la riqueza de especies de Asteraceae mediante extrapolación a partir de datos de presencia-ausencia. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, *76*, 5–18.

- Villaseñor, J. L., Maeda, P., Rosell, J. A. y Ortiz, E. (2007). Plant families as predictors of plant biodiversity in Mexico. *Diversity and Distributions*, *13*, 871–876.
- Villaseñor, J. L. y Ortiz, E. (2014). Biodiversidad de las plantas con flores (División Magnoliophyta) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad (Suplem.)*, *85*, S134–S142.
- Walther, B. A. y Morand, S. (1998). Comparative performance of species estimation methods. *Parasitology*, *116*, 395–405.
- Williams, P. H., Prance, G. T., Humphries, C. J. y Edwards, K. S. (1996). Promise and problems in applying quantitative complementary areas for representing the diversity of some Neotropical plants (families Dichapetalaceae, Lecythidaceae, Caryocaraceae, Chrysobalanaceae and Proteaceae). *Biological Journal of the Linnean Society*, *58*, 125–157.
- Xu, T. y Hutchinson, M. F. (2011). *ANUCLIM Version 6.1*. Australia, Fenner School of Environment and Society, Australian National University.
- Xu, T. y Hutchinson, M. F. (2013). New developments and applications in the ANUCLIM spatial climatic and bioclimatic modelling package. *Environmental Modelling and Software*, *40*, 267–279.
- Yoder, C. K. y Nowak, R. S. (2000). Phosphorus acquisition by *Bromus madri-tensis* ssp. *rubens* from soils interspaces shared with Mojave Desert shrubs. *Functional Ecology*, *14*, 685–692.