



Biogeografía

¿Dónde cultivar el árbol milagro, *Moringa oleifera*, en México? Un análisis de su distribución potencial

Where to grow the miracle tree, Moringa oleifera, in Mexico? An analysis of its potential distribution

Mark E. Olson^{a,*} y Leonardo O. Alvarado-Cárdenas^b

^a Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Tercer Circuito s/n, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México

^b Departamento de Biología Comparada, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado postal 70-282, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México

Recibido el 11 de septiembre de 2015; aceptado el 16 de mayo de 2016

Disponible en Internet el 1 de septiembre de 2016

Resumen

Originario de la India, el «árbol milagro» *Moringa oleifera* lleva ya varios siglos como parte de la horticultura tradicional del trópico seco mexicano, donde se cultiva principalmente para fines ornamentales. Con el reconocimiento reciente de sus propiedades nutritivas, farmacocinéticas e industriales, existe un creciente interés en fomentar su cultivo en México. Con base en una recopilación de registros de herbario y de observaciones en campo, se utilizan herramientas de modelado de distribución potencial (con el programa MaxEnt) para identificar las zonas del país con el clima óptimo para el cultivo de la especie. Los resultados indican que *M. oleifera* prospera preferentemente en zonas tropicales con temperaturas mínimas por encima de los 15 °C, con una precipitación menor a los 1,000 mm y altitudes de hasta 600 msnm. Esta combinación de características climáticas se encuentra principalmente en el trópico seco de la depresión del Balsas y en la costa del Pacífico. Un total de 13 estados presentan localidades óptimas para el cultivo de la moringa, destacando por su área Guerrero, Michoacán, Oaxaca y Jalisco. Se ofrece una lista de 222 municipios con el clima adecuado para el cultivo de la moringa. Se discuten medidas para lograr su cultivo en climas subóptimos y la necesidad de evitar su cultivo en localidades cubiertas por bosque tropical intacto.

Derechos Reservados © 2016 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0.

Palabras clave: Agricultura; *Moringa*; Plantas introducidas; Tierra caliente; Trópico seco

Abstract

Native to India, the “miracle tree” *Moringa oleifera* has been a part of lowland tropical horticulture in Mexico for centuries, where it is mostly grown as an ornamental. With recent recognition of its nutritional, nutraceutical, and industrial properties, there is increasing interest in cultivating the plant beyond its current use as street or patio trees. Based on an extensive compilation of herbarium and our own field observations, we use a tool known as potential distribution modeling to identify the parts of the country with optimal climate for growing moringa. The plant grows best in areas with mean minimum temperatures above 15 °C, low rainfall below 1,000 mm, and at low elevations below 600 m. This combination of characteristics is found mostly in the dry tropical heartland of the Balsas Depression and the tropical Pacific coast. The states with the greatest suitable acreage for moringa cultivation are Guerrero, Michoacán, Oaxaca and Jalisco, with nine additional states having some suitable acreage. We give a list of 222 Mexican counties by state with optimal climate for moringa cultivation and discuss strategies for cultivating the plant in areas with suboptimal climates.

All Rights Reserved © 2016 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. This is an open access item distributed under the Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

Keywords: Agriculture; *Moringa*; Introduced plants; “Tierra caliente”; Dry tropics

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: molson@ib.unam.mx (M.E. Olson).

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

Introducción

El legado biológico de los países megadiversos va mucho más allá de sus propias fronteras. Por ejemplo, la nochebuena (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotsch) es una planta originaria de México, pero cuyo proceso de selección en el extranjero ha sido tan largo y tan intenso que existen grupos enteros de variantes morfológicas que no se encuentran en el país (Trejo et al., 2012). De la misma forma, muchas plantas exóticas se han vuelto parte inseparable de la cultura y biota mexicana. Ejemplos al respecto incluyen el pirul o pirú (*Schinus molle* L.), elemento icónico del paisaje cultural del centro-sur del altiplano, donde la planta se puede considerar completamente naturalizada (Martínez, 1959). Mangos, cítricos y tamarindo, originarios de diversos puntos de Asia y África, son parte tan importante de la alimentación del mexicano que pocos se imaginan que no hayan sido siempre parte de la dieta mesoamericana. Es claro, entonces, que aun elementos no nativos forman parte del conjunto de plantas importantes para un país dado.

En muchos casos esta importancia va mucho más allá de la simple incorporación de una planta útil a la dieta y costumbres del país. Si bien el trigo no es una planta nativa, México desempeñó un papel clave en el desarrollo de las variedades semienanas que impulsaron la revolución verde (Trethowan, Reynolds, Ortiz-Monasterio y Ortiz, 2007). Por lo tanto, México sigue siendo un reservorio importante de la diversidad genética de esta planta clave para la humanidad. Otro ejemplo se presenta en los oasis del noroeste de México, donde fueron introducidas palmas datileras (*Phoenix dactylifera* L.) hace cientos de años. Estos cultivares ahora han desaparecido en la mayor parte del mundo, convirtiendo estas plantaciones en un reservorio de diversidad genética importante de esta planta tan valiosa para las personas de las zonas secas del mundo (Aschmann, 1957). México se ha convertido, entonces, no solo en un país de megadiversidad nativa sino que también se destaca por la diversidad por su flora no nativa.

Como para el trigo, los dátiles y muchas otras especies, México parece ser un lugar clave para el «árbol milagro» *Moringa oleifera* Lam., conocido también como «perla», «jacinto» o «moringa». Originaria de la India, la moringa llega a territorio nacional en la Nao de China y desde entonces ha formado parte de la horticultura tradicional en la costa tropical del Pacífico mexicano, así como en la depresión del Balsas (González Guinea, 2008; Martínez, 1959; Pacheco-Olvera, 2006). La planta es utilizada como alimento en Filipinas, donde tampoco es nativa, y se cree que los marineros en la ruta Manila-Acapulco la trajeron a México para fines alimenticios. En los siglos subsecuentes, en la mayor parte de México se ha perdido la costumbre de comer la moringa y el árbol se emplea principalmente como ornamental. Este cambio en el uso de la moringa podría implicar que variantes de sabor desagradable (por ejemplo, de sabor muy picante debido a su alto contenido de glucosinolatos-isotiocianatos) se hayan mantenido en el cultivo ornamental, mientras que estas mismas variantes en Asia han probablemente desaparecido por estas características negativas en el sabor. Fenómenos parecidos han sucedido en la canola (Fahey, Zalcman y Talalay, 2001). Otra razón potencial para

considerar a México como lugar clave para la moringa es que existe desde hace unos 10 años una nueva y pujante industria de su cultivo, lo que ha conllevado el ingreso de más germoplasma al país.

Moringa oleifera ha formado parte de la alimentación y medicina tradicional en el sur de Asia por miles de años, pero su auge reciente en México y en el resto del mundo se debe a 2 descubrimientos. En la década de 1990 se encontró que, gracias a su alto contenido proteínico (Olson y Fahey, 2011), la administración de polvo de hoja seca de moringa a madres en lactancia en situación de inanición extrema aumentaba la producción de leche, posibilitando así la supervivencia de los niños (Fuglie, 2001). El polvo de hoja de moringa empezó a usarse en zonas de emergencia, salvando miles de vidas. El otro descubrimiento ocurrió en el laboratorio, cuando se confirmaron sus propiedades quimioprotectoras anticáncer en animales (Bharali, Tabassum y Azad, 2003; Fahey, Dinkova-Kostova, Stephenson y Talalay, 2004; Murakami, Kitazono, Jiwajinda, Koshimizu y Ohigashi, 1998). El árbol también produce aceite comestible en sus semillas (Kibazohi y Sangwan, 2011) y una proteína coagulante que se puede usar para limpiar agua (Lea, 2010). Sus hojas presentan un efecto glucorregulatorio notorio (Ndong, Uehara, Katsumata y Suzuki, 2007). Todos estos usos en un árbol de muy rápido crecimiento y tolerante a la sequía convierten a la moringa en una especie clave para comunidades sostenibles en el trópico seco (Olson y Fahey, 2011). En especial, la moringa es de interés porque puede posibilitar a comunidades marginadas cubrir sus necesidades nutricionales urgentes y acceder a potentes sustancias quimioprotectoras (anticáncer).

A pesar de su importancia potencial, no existe información confiable publicada acerca de dónde se puede cultivar la planta. Esta carencia ha tenido 2 efectos. Primero, un número muy grande de intentos de cultivar la moringa han ocurrido en zonas no óptimas para su cultivo y casi todos estos proyectos han terminado en fracaso. Como se discute más adelante, es posible cultivar moringa en climas subóptimos, pero es necesario saber que un terreno es no óptimo y a partir de allí generar las estrategias agrícolas y expectativas en cuanto a rendimiento correspondientes. El otro efecto es que en las zonas ideales para su cultivo, los agricultores y otros habitantes desconocen muchas veces la idoneidad de su zona para esta actividad productiva.

Para conocer cuáles son las condiciones y las áreas apropiadas para el cultivo de la moringa, en este estudio se utilizan las herramientas de modelado de distribución potencial (Franklin, 2009; Peterson et al., 2011). Los modelos de distribución potencial están basados en la búsqueda de condiciones adecuadas o idoneidad ambiental, en donde una especie de interés pueda desarrollarse (Phillips, Anderson y Schapire, 2006). Estos modelos se traducen a mapas que indican los lugares que tienen una mayor probabilidad de presentar el clima en el cual podría prosperar la especie. Esta herramienta ha permitido contestar preguntas enfocadas no solo a la distribución potencial de especies silvestres, sino también de sus parientes cultivados (Miller y Knouft, 2006), así como a aspectos de la sistemática, conservación, evolución y biogeografía (Alvarado-Cárdenas et al., 2013; Franklin, 2009; Peterson et al., 2011).

Por lo tanto, esta herramienta podría ser de gran utilidad para caracterizar las condiciones climáticas donde crece la moringa y generar un mapa de predicción de las zonas de mayor potencial en México para su cultivo. En consecuencia, el presente estudio se enfoca a elaborar mapas de distribución potencial de la especie, así como a ubicar los municipios cuya superficie parcial o total presenta un clima apropiado para cultivarla. Esta información puede ser uno de los criterios fundamentales para que agricultores e instancias gubernamentales puedan tomar la decisión de sembrar moringa en un clima apropiado y reconocer cuando el clima es marginal y no recomendado para su cultivo, implementando medidas para corregir las carencias de un sitio particular.

También se discute la importancia de monitorear el posible status invasivo de la moringa con base en las predicciones realizadas por el modelo. A lo largo de los siglos de su cultivo en México, la moringa nunca ha dado señales de ser invasiva pero cualquier uso responsable de una planta no nativa implica tomar en cuenta la posibilidad de que se vuelva así. Se espera con este trabajo posibilitar un desarrollo informado del uso de la moringa en México, que forma parte del legado biológico de México desde hace ya muchos siglos.

Materiales y métodos

Para determinar cuáles son los sitios apropiados para el cultivo de *M. oleifera* en México, se realizó una búsqueda de los datos de distribución a partir de los ejemplares depositados en el Herbario Nacional de México (MEXU), datos bibliográficos y un programa extenso de recorridos de campo en Baja California, Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Durango, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán. Se incluyeron sitios

donde se sabe que la moringa forma parte del cultivo tradicional en calles y traspatios. Se excluyeron plantaciones agrícolas de moringa porque estas son un fenómeno reciente. Invocamos el supuesto de que las zonas de la horticultura tradicional reflejen aquellas zonas más propicias para el cultivo de la planta y han tenido siglos para demostrar su idoneidad al respecto. Por el contrario, las plantaciones agrícolas frecuentemente se ubican en lugares donde antes nunca se cultivó la moringa y no cuentan con el aval de siglos de cultivo exitoso. Además, muchas de estas plantaciones están en lugares incompatibles con las preferencias conocidas de todas las especies de *Moringa*, es decir, sitios tropicales secos con altitudes entre 0 y 500 (–1,000) m snm. Por lo tanto, se consideró la distribución geográfica en la que se practica la horticultura popular como la mejor guía de las preferencias climáticas de la especie en México, ubicándose 66 localidades (tabla 1, fig. 1). El material de herbario que no presentaba coordenadas de latitud y longitud fue georreferenciado por medio de mapas, gaceteros (Inegi, 2013) y Google Earth (<http://www.google.com/earth>). La base de datos de las localidades se exportó al programa ArcGIS 9.1 (Redlands, California, EE. UU; ESRI, 2006) para generar mapas de distribución conocida.

Para modelar la distribución potencial de moringa, más allá de los registros puntuales que documentamos, y conocer las zonas con las condiciones adecuadas para su cultivo, se utilizó el programa MaxEnt (Phillips et al., 2006), que implementa un algoritmo llamado máxima entropía. Esta herramienta de predicción utiliza datos detallados de clima y los registros de recolecta de la especie, lo que permite caracterizar el clima de cada localidad puntual donde se ha documentado la presencia de moringa. También permite identificar las zonas entre nuestras localidades donde muy probablemente se observan condiciones ambientales parecidas a las registradas en localidades conocidas (Phillips et al., 2006). Se ha considerado

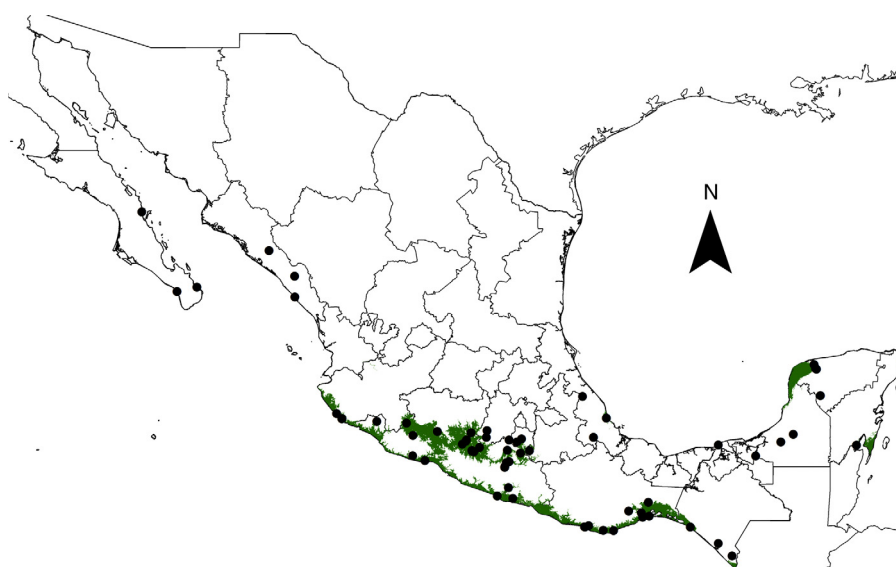


Figura 1. Localidades y distribución potencial del cultivo de *Moringa oleifera* en México. Los puntos negros indican las 67 localidades donde se ha documentado *M. oleifera* como parte de la horticultura tradicional. Con base en estas localidades y en el modelo de MaxEnt, las zonas sombreadas corresponden a las zonas con alta probabilidad de tener clima ideal para el cultivo de la moringa, sugerido con base en seleccionar los píxeles o cuadros con valores de probabilidad iguales o mayores al 50%.

Tabla 1
Localidades de *Moringa oleifera* en México.

Estado	Municipio	Localidad (fuente)	Latitud norte	Longitud oeste
Baja California Sur	Loreto	Loreto ^a	26.000000	−110.350000
Baja California Sur	La Paz	Todos Santos ^b	23.450403	−110.225106
Baja California Sur	San José	La Ribera ^b	23.589481	−109.584939
Campeche	Escárcega	Escárcega ^b	18.606667	−90.734444
Campeche	Escárcega	Carr. Villahermosa-Escárcega, km 293 ^a	18.150000	−91.550000
Chiapas	Escuintla	Acacoyagua ^a	15.340428	−92.678677
Chiapas	Tonalá	Santa Rosa, near beach ^a	15.855833	−93.6571361
Chiapas	Tonalá	Arista, Tonalá ^a	15.936253	−93.807183
Colima	Colima	Colima ^b	19.263736	−103.773506
Estado de México	Temascaltepec	Temascaltepec, Platana ^a	18.971667	−100.221388
Estado de México	Amatepec	San Martín Amatepec ^a	18.751522	−100.242222
Guerrero	Acapulco de Juárez	Parque Recreativo Papagayo, sobre Av. Miguel Alemán ^a	16.861388	−99.8877777
Guerrero	Acapulco de Juárez	Parque Nacional El Veladero, Col. María de la O. ^a	16.881946	−99.906071
Guerrero	Coyuca de Catalán	Coyuca de Catalán ^c	18.306303	−100.697994
Guerrero	Coyuca de Catalán	Amuco de la Reforma ^c	18.285997	−100.645036
Guerrero	La Huacana	La Huacana ^c	18.945456	−101.819425
Guerrero	Mártir de Cuilapan	Mezcala ^b	17.933889	−99.5997222
Guerrero	Iguala de Independencia	Iguala ^b	18.335	−99.5630555
Guerrero	San Marcos	San Marcos	16.785833	−99.3866666
Guerrero	Coyuca de Catalán	En Coyuca de Catalán en la salida a Zihuatanejo, al NO del centro del poblado ^a	18.328611	−100.704389
Guerrero	Juan Escudero	Puente sobre río Omitlán ^a	17.127778	−99.524722
Guerrero	Pilcaya	Grutas de Cacahuamilpa, hacia el río, 1,6 km al NE de Taxco ^a	18.666111	−99.506111
Guerrero	Ameyaltepec	Ameyaltepec ^a	17.966944	−99.5066666
Guerrero	Tlalchapa	Proximidades a Tlalchapa ^a	18.429167	−100.458611
Guerrero	Zumpango del Río	On road from Xochipala 1 km towards Milpilas ^a	17.783333	−99.650000
Jalisco	La Huerta	Chamela ^b	19.523358	−105.071919
Jalisco	La Huerta	Arroyo Chamela, cerca del puente, a un lado del camino a la playa La Marina ^a	19.530563	−105.080428
Jalisco	La Huerta	Miguel Hidalgo ^b	19.361689	−104.895192
Jalisco	La Huerta	Agua Caliente ^b	19.353089	−104.903789
Michoacán	Apatzingán	En una casa de la H. de la Huerta de Apatzingán	19.099079	−102.287925
Michoacán	Lázaro Cárdenas	Lázaro Cárdenas ^b	18.002369	−102.220900
Michoacán	Tepalcatepec	Tepalcatepec ^b	19.207469	−102.815444
Michoacán	La Huacana	Cupuacillo ^b	18.815722	−102.610750
Michoacán	Huetamo	En Las Colonias, Huetamo ^a	18.627222	−100.903333
Michoacán	Huetamo	Carr. Huetamo-San Jerónimo. EN Arroyo Seco aprox. 25 km al O de Huetamo ^a	18.532222	−101.015666
Michoacán	Huetamo	En la Parota, salida a La Estancia, aprox. A 6.5 km al NE de Huetamo ^a	18.664594	−100.884378
Michoacán	Huetamo	Cerca del Cerro de Dolores	18.666836	−100.865806
Michoacán	Lázaro Cárdenas	Playa La Soleada, carr. Playa Azul Caleta de Campo ^a	18.053056	−102.641944
Michoacán	Tiquicheo	Entre Tepeguaje y Paso de Tierra Caliente ^a	18.898611	−100.734083
Michoacán	Tiquicheo	En Tiquicheo ^a	18.898485	−100.737691
Morelos	Jojutla de Juárez	Tequesquitengo ^b	18.606389	−99.2503611
Morelos	Tlaltzapán	Temilpa Viejo ^a	18.700278	−99.1077777
Oaxaca	San Pedro Pochutla	Pochutla ^b	15.749167	−96.4683333
Oaxaca	Santo Domingo Tehuantepec	Tehuantepec ^b	16.319088	−95.241083
Oaxaca	Santo Domingo Petapa	Camino del pueblo Santo Domingo Petapa ^a	16.318611	−95.2411111
Oaxaca	Santa María Huatulco	Carretera a la playa La Entrega, punto denominado El Mirador ^a	15.746167	−96.130389
Oaxaca	Magdalena Tequisixtlán	A 1 km al SW de La Pajima, o sea a 10 km al SW de Magdalena Tequisixtlán ^a	16.37	−95.6497222
Oaxaca	San Pedro Mixtepec	Zicatela, hacia Puerto Escondido ^a	15.857778	−97.056667
Oaxaca	Asunción Ixtaltepec	Camino a Gaña. Sobre el camino a «La Mata», 1 km al SE de Nizanda ^a	16.658056	−95.011111
Oaxaca	Salina Cruz	Salina Cruz ^a	16.176667	−95.1922222
Oaxaca	San Mateo del Mar	San Mateo del Mar ^a	16.213889	−94.9841416
Oaxaca	Santa María Colotepec	Santa María Colotepec ^b	15.898056	−96.939167
Oaxaca	San Pedro Mixtepec	Puerto Escondido ^a	15.865833	−97.0729416
Puebla	Jolalpan	Huerto familiar en los alrededores del poblado de Jolalpan ^a	18.321944	−98.8491666
Quintana Roo	Cancún	En los alrededores de Cancún ^a	21.159167	−86.8447222
Quintana Roo	Othon P. Blanco	Chetumal ^a	18.500608	−88.2925

Tabla 1 (continuación)

Estado	Municipio	Localidad (fuente)	Latitud norte	Longitud oeste
Quintana Roo	Cancún	A la entrada del Pueblo Bonfil ^a	21.0875	–86.8430555
Sinaloa	Culiacán	Culiacán ^b	24.773578	–107.253867
Sinaloa	Mazatlán	Mazatlán ^b	23.273611	–106.422777
Sinaloa	San Ignacio	San Ignacio ^a	23.941944	–106.43
Veracruz	La Antigua	Ciudad Cardel ^b	19.373611	–96.3680555
Veracruz	Omealca	On depression of boulders along the banks of Río Blanco, Omealca, 13 km N of Campo experimental de Hule, El Palmar, Zongolica ^a	18.751111	–96.7819444
Yucatán	Mérida	Mérida ^b	20.973333	–89.6158333
Yucatán	Mérida	Mérida ^b	20.983333	–89.6166666
Yucatán	Mérida	2 km antes de llegar a Xmatkuil ^a	20.950000	–89.583333
Yucatán	Oxkutzcab	Xul, poblado. Oxkutzcab ^a	20.102222	–89.460000

^a Herbario, MEXU.

^b Avistamiento personal.

^c Reporte de agricultor.

que MaxEnt es una de las herramientas de predicción de la distribución potencial de especies con mayor grado de confiabilidad (Elith et al., 2006, 2011), por lo que se ha tomado la decisión de utilizarlo en este trabajo. El resultado final del modelo de predicción de MaxEnt en el presente estudio es un mapa de la extensión geográfica del clima óptimo para el cultivo de la moringa, también conocido como un modelo de distribución potencial. Se utilizó la configuración por defecto del programa de MaxEnt para generar el modelo de distribución potencial.

Las capas de información climática para el ajuste del modelo fueron obtenidas de la WorldClim Global Climate GIS Database con una resolución espacial de 30 segundos (ca. 1 km²) (Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis, 2005, <http://www.worldclim.org>). Esta resolución significa que las capas están divididas en una retícula, donde cada cuadro o pixel tiene un tamaño aproximado de 1 km², que cubre la extensión de los países a partir de los cuales se obtuvo información del clima y donde cada cuadro tiene un valor para cada variable climática (Hijmans et al., 2005). La base de WorldClim contiene 19 variables climáticas calculadas tomando en cuenta la altitud y diferentes mediciones derivadas de la temperatura y la precipitación. Se ha señalado que la inclusión de todas estas variables puede causar problemas de sobreajuste del modelo de distribución, ya que varias de estas capas de información

pueden estar fuertemente correlacionadas (Beaumont, Hughes y Poulsen, 2005; Heikkinen et al., 2006). Se emplearon 8 variables climáticas (tabla 2) para modelar la distribución de moringa que, además, permite inspeccionar a nivel nacional las zonas óptimas y las no óptimas para el cultivo de la especie. Seleccionamos estas variables con base en un análisis de componentes principales y apoyados en los resultados del análisis de Jacknife realizado por MaxEnt a las 19 variables y la altitud de WorldClim.

Para evaluar la calidad del modelo utilizamos los valores del área bajo la curva receiver operating characteristics (ROC). Para validar el modelo se utilizaron el 70% de los registros puntuales de la especie seleccionados al azar para generar los modelos y el restante 30% de datos para su evaluación. También se implementó una prueba de proporciones con el fin de evaluar si el modelo era mejor que cualquier otro modelo obtenido al azar ($p < 0.5$). Esta prueba es binomial y cuantifica los registros de prueba con los valores de probabilidad de predicción mayores que un umbral determinado. En este caso, se usó como umbral el percentil del 10% (Cruz-Cárdenas, Villaseñor, López-Mata y Ortiz, 2012).

El modelo que resulta del análisis de los datos de las localidades y las capas climáticas es un mapa de predicciones de cuáles son las áreas donde las condiciones climáticas son óptimas para una especie. Este mapa presenta una serie de valores

Tabla 2

Variables empleadas para realizar el modelo de distribución potencial de *Moringa* en México, así como algunas medidas descriptivas del mapa de distribución potencial.

Variables	N	Mín	Máx	Media
Altitud m snm	76,288	0	1202	287.16
Temperatura media anual °C	76,288	23.80	29.20	26.94
Isotermalidad (intervalo de temperatura media diaria/intervalo de temperatura anual) (* 100)	76,288	55	86	68.79
Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100)	76,288	0.17	0.94	0.50
Intervalo de temperatura anual (temp. máxima del mes más caliente-temp. mínima del mes más frío)	76,288	10.90	28.50	19.63
Temperatura media del trimestre más frío	76,288	21.00	27.50	25.02
Precipitación anual	76,288	565	2287	973.81
Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	76,288	5.3	12.5	10.98

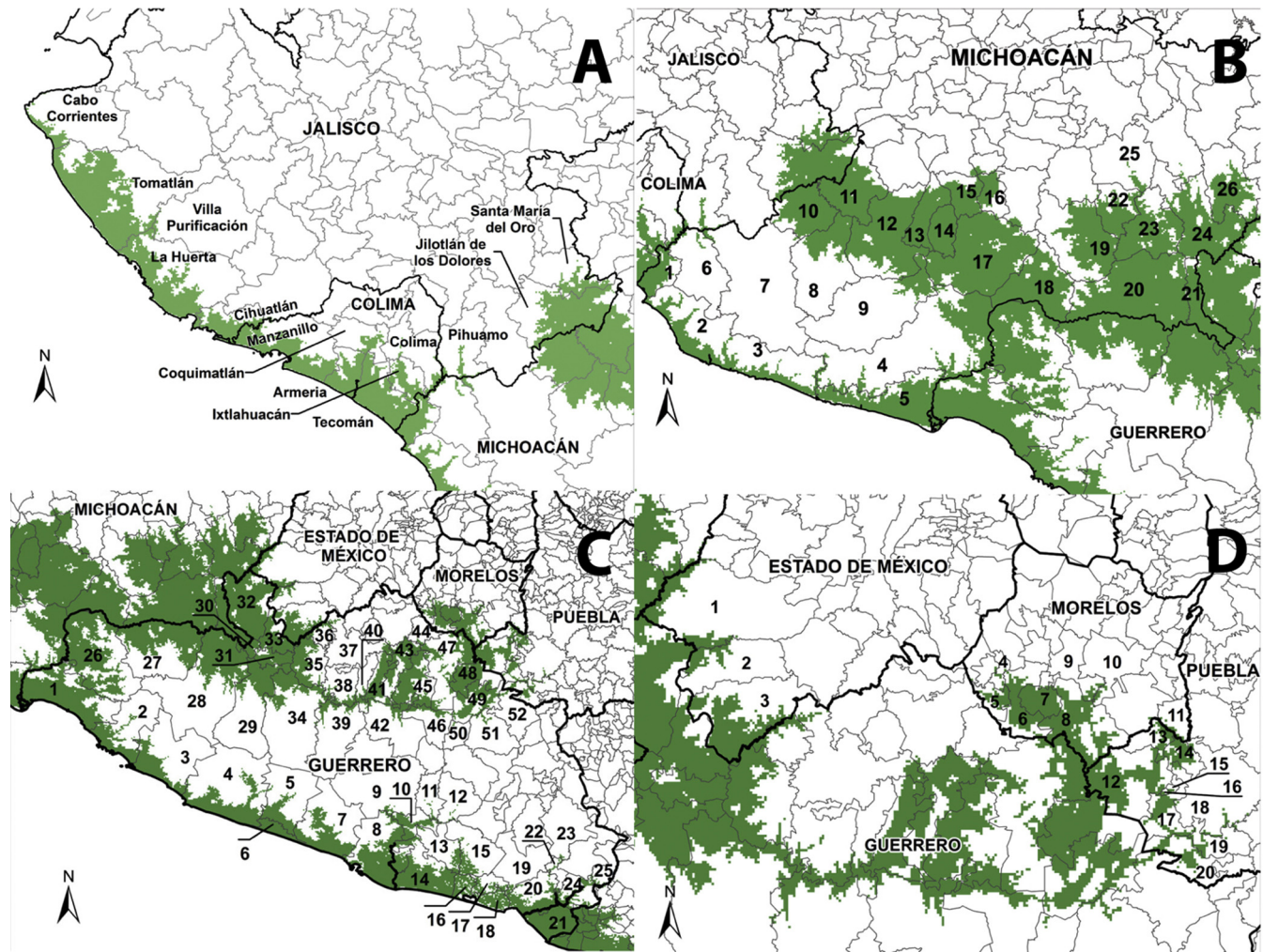


Figura 2. Distribución potencial de *Moringa oleifera* en la depresión del río Balsas y zonas adyacentes. A, Jalisco y Colima. B, Michoacán. C, Guerrero. D, Franjas norte y orientales de la depresión del Balsas en el Estado de México, Morelos y Puebla. Los nombres que corresponden a los municipios designados con un número se encuentran en el [anexo 1](#).

de probabilidad, que van de 0 a 100, asociado a cada uno de los pixeles de la cuadrícula (Phillips et al., 2006). A partir de estos valores se selecciona un umbral o punto de corte para decidir en qué punto el modelo explica mejor las condiciones adecuadas en las que podría crecer la especie (Liu, Berry, Dawson y Pearson, 2005; Liu, White y Newell, 2013). Este umbral se selecciona con base en el número de localidades omitidas o no predichas por el modelo.

Se seleccionó el umbral del percentil del 10% que resultó con valores bajos de omisión como aquellas zonas en donde las condiciones podrían considerarse como marginales por sus bajos valores. Para indicar tanto las zonas con clima óptimo como las zonas cercanas al clima óptimo, o submarginales, donde el rendimiento será potencialmente adecuado para una aplicación dada, se generaron mapas para cada uno de los estados del país que contaran con pixeles con una probabilidad de 50% o mayor. Para nuestros fines, es importante poner énfasis especial en las zonas de clima óptimo para el cultivo de la moringa, es decir, las que tienen la más alta probabilidad de presentar un clima óptimo. Los resultados del modelo se ubicaron a nivel estatal y municipal.

Resultados

Los datos de la distribución conocida del cultivo de moringa muestran que está presente en 15 estados de la República Mexicana, la mayoría de ellos distribuidos en la costa del Pacífico. El modelo de distribución potencial corrobora la mayoría de los puntos de cultivo conocidos y proyecta nuevas entidades federativas con el clima apropiado para el desarrollo de esta actividad (figs. 1–3). Las pruebas de validación del modelo obtenido son significativamente mayores que un modelo obtenido por azar (tabla 3). Los mapas del modelo distribución potencial obtenidos con base en los umbrales del 10% y del 50% resaltan la zona del cultivo tradicional de la moringa dentro del territorio nacional (fig. 1).

El mapa del modelo editado con base en la probabilidad del 10% arrojó una superficie de 91,293 km² y el de probabilidad del 50% fue de 63,962 km² como potencialmente idónea para el cultivo de moringa en México (fig. 1, tabla 4). Esto equivale al 3.24 y 2.27% respectivamente de la superficie del país. Con base en el mapa del 50%, los estados con mayor probabilidad de condiciones adecuadas fueron 13, sobresaliendo por su mayor superficie

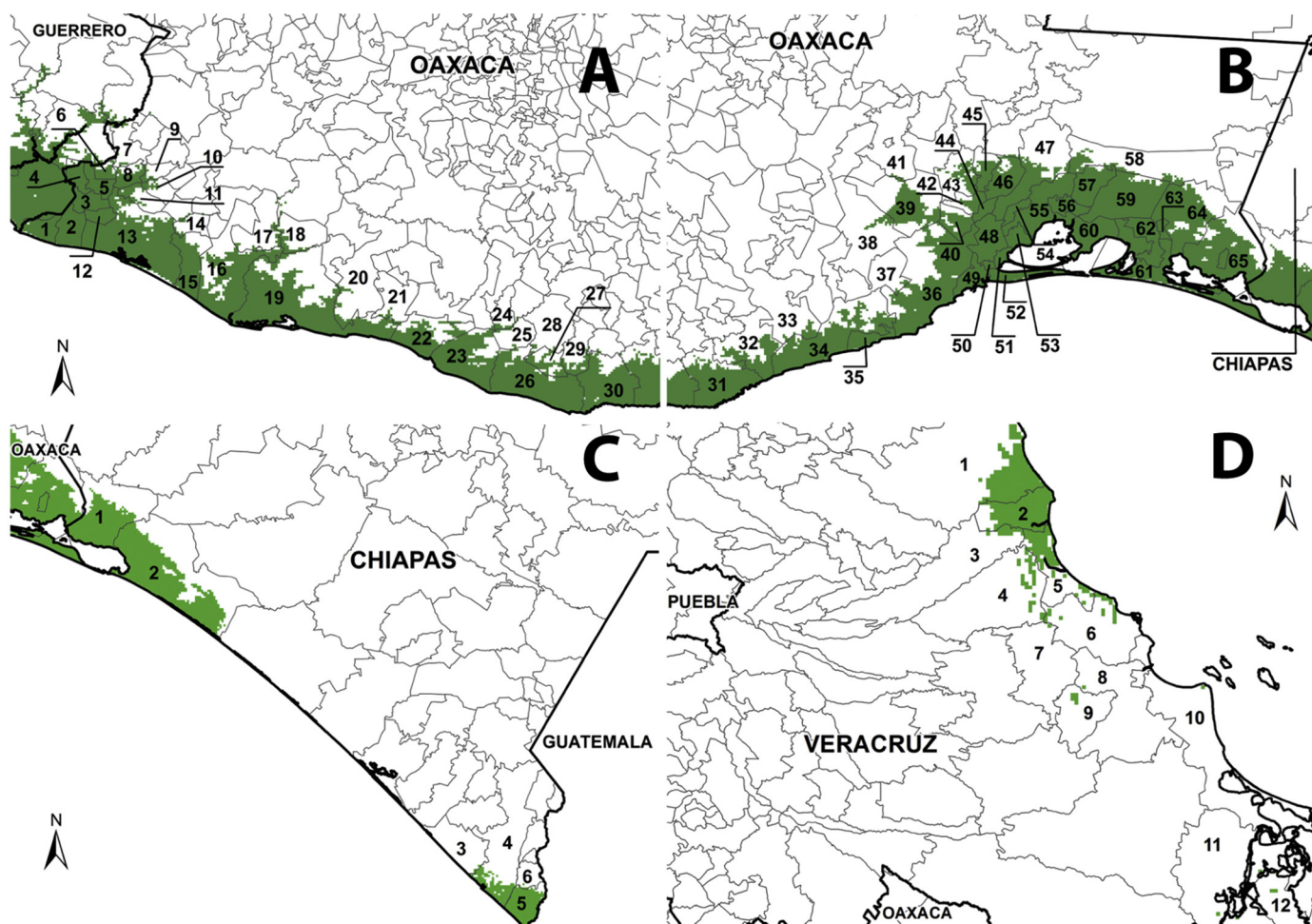


Figura 3. Distribución potencial de *Moringa oleifera* en Oaxaca, Chiapas y Veracruz. A, Oaxaca. B, Chiapas. C, Veracruz. Los nombres que corresponden a los municipios designados con un número se encuentran en la el [anexo 1](#).

Tabla 3

Resultado de las pruebas de validación para el modelo de distribución potencial de *Moringa* en México.

	Puntos únicos	Umbral logístico del percentil 10	Área bajo la curva ROC entrenamiento/prueba	Prueba de proporciones $p=0.5$
<i>Moringa oleifera</i>	60	0.237	0.962/0.918	$p=0.072$

Tabla 4

Superficie óptima para el cultivo de *Moringa* por estado, calculada a partir del modelo de 50%.

Estado	km ²
Guerrero	19,283
Michoacán	16,928
Oaxaca	11,448
Jalisco	3,861
Yucatán	3,726
Colima	1,988
Chiapas	1,599
Campeche	1,491
Quintana Roo	1,284
Morelos	694
México	661
Puebla	658
Veracruz	341
Total	63,962

Guerrero, Michoacán y Oaxaca, que en conjunto engloban más del 50% de la superficie idónea para el cultivo de la moringa, mientras que Veracruz presentó el valor más bajo ([tabla 4](#)).

El total de municipios que presentaron superficie idónea para el cultivo de moringa fueron 222. Estos municipios se enlistan por estado en el [anexo 1](#). Con base en el mapa del 50%, se extrajeron los valores de elevación, temperatura y precipitación que se sugieren como los más adecuados para el cultivo de la moringa en México ([tabla 2](#)) y que además tienen una importante contribución en el modelo de acuerdo con el análisis de Jackknife (material suplementario).

Discusión

Los resultados, que se resumen en las [figuras 1–3](#), muestran que moringa es claramente una planta de las zonas tropicales

de baja altitud del país, donde la precipitación se concentra en una época del año. Esta combinación de condiciones se obtiene esencialmente en las zonas tropicales secas, popularmente denominadas «tierra caliente» en México. La costa tropical del Pacífico y la depresión del río Balsas son regiones ideales para el cultivo de la moringa. Nuestros modelos arrojaron también la punta noroeste de la península de Yucatán como idónea. Si bien no contamos con datos sobre la presencia de moringa en esta área, parecería posible, dado que esta es la parte de la península cuya vegetación nativa dominante es el bosque tropical caducifolio, justo como en las demás regiones donde mejor crece esta especie.

Es claro que la moringa requiere de temperaturas altas. Sin embargo, probablemente el factor más importante para limitar la distribución de la planta, y por ende su cultivo, es la temperatura mínima absoluta, es decir, la más baja que se experimenta a lo largo del año (material suplementario). Esto tiene sentido, pues esta última variable climática es la que lleva a las plantas a sus límites de tolerancia y no las temperaturas promedio. Si bien es cierto que en muchas partes del Altiplano mexicano, o en lugares como el Valle del río Colorado, se registran temperaturas elevadas una buena parte del año, también es cierto que en estas zonas muchas noches registran una temperatura por debajo de los 15 °C. Los datos de WorldClim que usamos para nuestro modelo no tienen la temperatura mínima absoluta, pero sugieren que la temperatura promedio ideal del trimestre más frío del año para la moringa oscila entre los 21 y 23 °C. En cuanto al valor absoluto mínimo para el cultivo óptimo de la moringa, parecería estar alrededor de los 15 °C. Por ejemplo, datos del Servicio Meteorológico Nacional (<http://smn.cna.gob.mx/>; «Normales Climatológicas») muestran que lugares donde la moringa crece excepcionalmente bien, como en la zona del Infiernillo, Michoacán, o el sur del Istmo de Tehuantepec, tienen valores de temperatura mínima absoluta, en los años más excepcionales, de 15-17 °C, pero la mayor parte del tiempo y en la mayoría de los años se presentan valores más altos. Si bien se conoce poco acerca del desempeño de la planta en climas marginales, se puede decir que si el número de noches por debajo de los 23 °C como mínimo promedio o alrededor de 15 °C como mínimo absoluto aumenta, un sitio se alejará siempre más del clima ideal de la moringa y por lo tanto de su rendimiento óptimo. También debe considerarse que probablemente existen distintas combinaciones de condiciones que pueden perjudicar el crecimiento de la planta. Por ejemplo, un mes a 10 °C es probablemente igual de perjudicial que una sola noche a 0 °C. La temperatura mínima absoluta, entonces, parecería ser el factor más determinante del desempeño de la moringa.

Las temperaturas altas son mucho menos importantes en la limitación del crecimiento de la moringa. Temperaturas promedio adecuadas están en el intervalo de 26-29 °C. Sin embargo, una de las grandes ventajas de la moringa para la agricultura de tierra caliente es que tolera temperaturas altas y si hay agua en el suelo, ni siquiera tirará sus hojas. Para retomar los ejemplos del Infiernillo y el Istmo, los datos muestran que se registran temperaturas mayores a 40 °C frecuentemente. La temperatura alta no es una variable relevante, porque cualquier

lugar que cumpla con los requisitos mínimos de temperatura de la moringa también estará dentro de su intervalo de tolerancia en cuanto a temperaturas máximas.

En contraste con la temperatura máxima, después de la temperatura mínima absoluta y la promedio, el siguiente factor que más influye en predecir dónde se puede cultivar exitosamente la moringa es la precipitación, tanto su distribución a lo largo del año, como su cantidad, así como su interacción con el suelo. Se puede decir que seguramente cualquier lugar que cumpla con los requisitos mínimos de temperatura de la moringa también cumplirá con sus requisitos mínimos en cuanto a precipitación. El problema para esta especie en muchas partes del trópico es el exceso de agua, ya que crece mejor en lugares con menos de 970 mm de lluvia al año y donde la lluvia cae en una o 2 estaciones breves, no distribuida a lo largo del año. Zonas tropicales favorables para el cultivo de plantas como cacao, mangostán, café, té, palma de aceite o pimienta son demasiado húmedas para el crecimiento satisfactorio de la moringa, ya que no tolera la inundación de sus raíces, sobre todo en suelos de textura fina, que impidan el paso de oxígeno a las raíces. Sin embargo, incluso en los mejores suelos las moringas morirán si las raíces no tienen una aeración adecuada. Por ejemplo, con su porosidad y alto contenido de nutrientes, los suelos volcánicos profundos pueden considerarse ideales para las moringas así como muchas otras plantas, pero en una zona de alta precipitación, la especie presentará seguramente un crecimiento subóptimo.

Con respecto a latitud y altura sobre el nivel del mar, la moringa es una planta tropical de bajas altitudes, que prospera mejor por debajo de los 600 m snm. En algunas zonas, sin embargo, se cultivan moringas hasta aproximadamente los 1,000 m de altitud, como en Tequesquitengo, Morelos. La especie puede sobrevivir, pero marginalmente, en la franja altitudinal de 1,000-1,500 m. Zonas por encima de los 1,500 m de altitud están completamente fuera de las condiciones idóneas para el cultivo. En resumen, las localidades óptimas para la moringa se encuentran en zonas con unos 15 °C de temperatura mínima absoluta, con lluvias estacionales de hasta 1,000 mm, de preferencia en suelos bien drenados y en una cota altitudinal máxima de 600 m.

Localidades para el cultivo óptimo de la moringa

Para ayudar a guiar la elección de sitios ideales para el cultivo de la moringa en México, así como la canalización de recursos para fomentar dicho cultivo, se presentan una serie de mapas detallados. Empezamos con la zona de extensión más grande de clima adecuada, la costa del Pacífico y la depresión del Balsas. Posteriormente se mencionan algunas zonas secundarias en la vertiente del Atlántico.

El clima ideal para la moringa se encuentra en casi la totalidad de la costa del Pacífico tropical mexicano, aproximadamente desde Cabo Corrientes hacia el sur (fig. 2A). Todos los municipios costeros de Jalisco y Colima presentan clima adecuado para el cultivo de la moringa, pero por su topografía accidentada y su aumento relativamente rápido en altitud con distancia de la costa, así como por su área, únicamente sus

regiones costeras presentan el clima óptimo. Tal es el caso, por ejemplo, del municipio de La Huerta, que tiene un clima ideal en sus llanuras y lomeríos cerca de la costa, pero en su interior, como en la cabecera municipal La Huerta, donde se encuentra una estación de investigación del INIFAP, el clima ya empieza a distar de lo ideal. En Colima, la situación es parecida, pero por las extensiones de tierras bajas hasta el centro del estado, el clima ideal se extiende más lejos de la costa, incluso por la zona de la capital del estado. En el sur de Jalisco existe una pequeña zona de clima óptimo alejada de la costa, principalmente en los municipios de Jilotlán y Santa María del Oro (fig. 2A, abajo a la derecha). Esta zona forma parte de la depresión del río Balsas, que se encuentra principalmente en Michoacán y Guerrero.

Las zonas costeras de Michoacán y Guerrero también presentan extensiones importantes para el cultivo de la moringa, y especialmente en la depresión del río Balsas (fig. 2B, C). Municipios altamente poblados como Tepalcatepec, Apatzingán, Nueva Italia, Ciudad Altamirano, Iguala y Mezcala son ejemplos al respecto. Estas zonas cuentan con un clima con temperaturas mínimas excepcionalmente altas. De hecho, la zona del Infiernillo tiene las temperaturas mínimas más altas del país, según registros del Servicio Meteorológico Nacional (<http://smn.cna.gob.mx/>; «Normales Climatológicas»). Aislado de los efectos moderadores de la costa, la humedad en la época de secas es bajísima y la insolación intensa. Observamos algunos pueblos en la zona del Infiernillo, en Michoacán, donde los únicos árboles que crecían entre las casas eran moringas, verdes a pesar del sol, las altas temperaturas y la sequía intensa.

Por lo anterior, Guerrero y Michoacán son los estados con más superficie de clima potencialmente adecuado para el cultivo de la moringa en el país, con 1,928,300 y 1,692,800 ha, respectivamente (tabla 4). Sin embargo, la zona del Balsas se extiende también a los estados adyacentes de México, Puebla, y sobre todo Morelos (fig. 2D). Lamentablemente, en general las comunidades de la depresión del Balsas presentan un cierto grado de marginación (Coneval, 2010). Por lo tanto, la capacidad de la moringa de fungir como fuente de alimento, de sustancias quimioprotectivas anticáncer y potencialmente como producto comercializable, vuelve especialmente valiosa a la planta en estas zonas.

Las costas de Oaxaca y en menor medida las de Chiapas también presentan condiciones para el cultivo de la moringa (fig. 3A, B). Especialmente en el primer estado, existen reportes de varios usos tradicionales de la planta, incluso para fines alimenticios (Lomelí-Ramírez, 2009). En Oaxaca destaca la vertiente del Pacífico del istmo de Tehuantepec, donde la extensión de las llanuras bajas, el suelo muchas veces arenoso y bien drenado, así como las temperaturas mínimas altas, permiten que las moringas sean excepcionalmente frondosas. La costa de Chiapas, adyacente al istmo, también tiene áreas pequeñas ideales para la moringa, por ejemplo, en las cercanías de Arriaga y Tonalá. Más sorprendente fue la predicción de clima ideal de la especie en los municipios del extremo sur del estado, al sur de Tapachula. Esta zona es, en general, productora de plantas de climas húmedos y no se esperaba este resultado. Sin embargo, una explicación posible es que la lluvia disminuye con la cercanía

a la costa en esta zona, por ejemplo, en las inmediaciones de Puerto Madero. En consecuencia, estas zonas podrían ofrecer el clima adecuado para el cultivo de la moringa, una posibilidad que valdría la pena explorar con más detalle posteriormente.

Dos zonas menores predichas en el modelo estuvieron en Veracruz y en la península de Yucatán, principalmente en el estado de Yucatán. Se conoce, desde hace mucho tiempo, en las zonas de bosque tropical caducifolio en Veracruz, una tradición local de cultivo de la moringa, tal y como lo demuestran ejemplares de herbario y nuestras observaciones en campo. Esta zona de cultivo tradicional coincide con los municipios de La Antigua y el puerto, entre otros. En municipios como Alvarado, que resultaron tener clima ideal para moringa en nuestro modelo, no hemos observado el cultivo tradicional de la planta. De la misma forma, el modelo mostró la presencia de clima ideal en el noroeste de la península de Yucatán. Es justo esta zona que es conocida por ser la parte de la península que presenta como vegetación predominante el bosque tropical caducifolio, a diferencia de la selva mediana que domina en el resto de la península. Por el momento no existen evidencias de que se cultive moringa en las inmediaciones de Punta Allen, zona que también se destacó en el modelo. La moringa parece ser una planta de bosque caducifolio en zonas tropicales o quizás apenas afuera de la zona tropical, en su estado silvestre (Olson, 2010), y la mayoría de sus localidades en el resto del país se encuentran en zonas con este tipo de vegetación. Por lo tanto, las predicciones anteriormente mencionadas son congruentes con lo que sabemos de la biología de las moringas.

Localidades subóptimas para el cultivo de la moringa

La moringa se cultiva en algunas zonas de México como parte de la horticultura tradicional, a pesar de que no presentan un clima óptimo. Estas zonas están incluidas en la figura 1 como localidades de cultivo tradicional (puntos de colecta marcados en el mapa), pero ubicadas en áreas fuera del polígono (sombreado). Bajo este régimen climático, el crecimiento de la especie no es tan rápido como en climas más favorables y en consecuencia, los rendimientos en términos de hojas y semillas serán más bajos. Sin embargo, las plantas se han empleado tradicionalmente para fines más bien ornamentales, donde un crecimiento subóptimo no afecta los ingresos económicos que se derivan de su cultivo o sus propiedades nutricionales (observación nuestra). Como ejemplos, es posible encontrar moringas en Baja California Sur, en el lado del Pacífico, desde Todos Santos en dirección hacia el sur, mientras que en el lado del golfo son comunes en la zona del Cabo hasta La Paz y de manera más esporádica hasta Loreto. También se pueden encontrar moringas en el lado oriental del golfo de California. Al igual que en la mayoría de la costa pacífica de México, también en el sur de Sonora y en casi toda la costa de Sinaloa se pueden encontrar moringas sembradas con propósitos ornamentales. Incluso en los últimos años existe una producción comercial de moringa en el valle del Yaqui en Sonora. Este interés por cultivar la planta en la zona no es nuevo, pues Martínez (1959) reporta que «El Ferrocarril del Sud Pacífico, por conducto de su Departamento Industrial y Agrícola hizo algunos trabajos de introducción y

aclimatación [de *M. oleifera*] en Escuinapa, Rosario y Culiacán, Sin. y en Empalme, Son.» (p. 416). En el Pacífico, entonces, encontramos varios ejemplos de moringas que sobreviven fuera de la zona óptima.

De manera parecida, en la vertiente del Atlántico parece ser común cultivar la moringa, a pesar de carecer del clima ideal. Tal es el caso de la península de Yucatán, donde es posible encontrar plantas en Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Moringa es un árbol de ornato ocasional en las calles de Mérida e incluso es uno de los árboles principales en los camellones de la carretera Mérida-Chichén Itzá. También se le observa en las calles de San Miguel de Cozumel, Quintana Roo y Escárcega, Campeche. Estas zonas no presentaron el clima ideal en nuestro modelo probablemente por su precipitación relativamente elevada, pero el suelo notoriamente poroso de la Península muy probablemente permite que las plantas puedan persistir aun en condiciones de alta humedad. Esta capacidad para el suelo de compensar por una situación climática que carece o excede en algún aspecto nos lleva a comentar brevemente sobre el cultivo de la moringa en situaciones francamente marginales.

El cultivo en climas francamente subóptimos

Existe mucho interés en el cultivo de la moringa en zonas bastante alejadas de sus climas ideales. Lamentablemente existe muy poca investigación acerca de las técnicas disponibles para amortiguar los efectos negativos del cultivo de la especie en un clima subóptimo, y sobre comparaciones de rendimiento entre zonas tropicales óptimas y subóptimas. Esta información sería útil, pues el simple hecho de presentar un clima fuera del ideal no implica que el cultivo de una planta no pueda ser factible e incluso rentable. El maíz es un ejemplo excelente al respecto. El ancestro silvestre del maíz es una planta de los hábitats tropicales secos de la depresión del Balsas y seguramente un análisis parecido al nuestro señalaría esta región como la ideal para su cultivo. Sin embargo, el maíz se cultiva con gran éxito en muchas partes de la zona templada, como en los Estados Unidos de América, Argentina y China, muy lejos de la zona donde se presenta su clima ideal.

De la misma forma, existen razones para pensar que el cultivo de la moringa puede ser aceptable también en ciertas zonas claramente subóptimas, debido al crecimiento sumamente rápido de la planta. En zonas tropicales óptimas hemos observado un crecimiento de hasta 8 m de altura en el primer año de establecimiento y se puede decir que 4-6 m es un intervalo de altura normal para este primer año. Las plantas florecen a los 6 meses y fructifican en su primer año. Por lo tanto, en un lugar con una estación de crecimiento larga y condiciones de cultivo muy favorables, como pasa en muchas partes de la zona templada, es potencialmente posible lograr cosechas económicamente aceptables de moringa cultivándola como una planta anual. Esta propuesta no es meramente una idea, ya que existen variedades que se cultivan anualmente en la India, por ejemplo, la variedad Perikuliyam, que se cultiva por sus frutos tiernos. Las plantas se siembran al final de la época de secas y para finales de la época de lluvias se cosechan rendimientos de cerca de 10 toneladas de frutos por hectárea. Quizás es posible aprovechar el crecimiento rápido

de la planta para alcanzar rendimientos comparables en zonas extratropicales.

Varias técnicas están disponibles para lidiar con algunos de los factores subóptimos en el cultivo de la moringa. Para zonas donde la precipitación es demasiado abundante, a veces los agricultores crean montículos o crestas de suelo de alrededor de un metro de altura, con la finalidad de promover la filtración del agua y la oxigenación del suelo, por lo menos en la zona inmediata de las raíces principales. De esta forma se puede intentar evitar la muerte de las raíces, incluso en zonas donde la precipitación sería de otra forma excesiva. Lidiar con temperaturas bajas resulta más difícil, pues requiere invernaderos y calefacción artificial. Sin embargo, parece que las moringas pueden, si no prosperar, al menos sobrevivir a congelamientos leves. Hemos observado estas condiciones en Monterrey, Nuevo León, así como en el sur de California y Texas (EUA). En algunos de estos casos, las temperaturas bajas dañan únicamente a las ramas terminales pero en otros solo sobrevive el tronco. En estas condiciones, el crecimiento se presenta durante los periodos favorables en los que los cultivadores reportan rendimientos aceptables para su uso personal o forrajero (obs. personal). Una técnica de amortiguamiento del frío que observamos en el altiplano de Guanajuato, en un criadero de conejos, donde se utiliza la moringa como fuente de proteína, fue colocar los árboles muy cerca de una pared con exposición hacia el sur. Durante el día la pared se calienta y de noche irradia suficiente calor que consiente la persistencia de los árboles y un rendimiento suficiente para cumplir con las necesidades del criadero. Estos ejemplos anecdóticos resaltan tanto el interés que existe en cultivar la moringa fuera de su zona climática ideal, como la importancia de investigación comparativa sobre el desempeño del árbol en zonas climáticas marginales en comparación con zonas tropicales secas y subraya la importancia de conocer la distribución del clima óptimo de la moringa. Conocer la distribución del clima óptimo permite una elección informada de zonas de cultivo, ya sea de una zona ideal, con todos los beneficios que esta elección implica en cuanto a facilidad de cultivo, ya sea de una zona con condiciones marginales, de manera que se puedan implementar medidas de compensación desde el inicio. También resalta la importancia de conocer el clima ideal de la moringa como herramienta en el monitoreo de esta planta no nativa.

Moringa: una especie cultivada, no invasora

No existen reportes de *M. oleifera* como una planta invasora en hábitats naturales en ninguna parte del mundo (Olson, 2010). Sin embargo, como con cualquier planta exótica, es importante mantener una vigilancia estricta para detectar cualquier tendencia invasora en cuanto aparezca. A pesar de que la moringa ha estado en México desde hace varios siglos, y que se cultiva ampliamente en las zonas del país con clima propicio, nunca se ha observado una tendencia invasora en esta planta, lo que hace muy poco probable que esto pueda presentarse en el futuro cercano. Los autores hemos observado que en algunas localidades, como a lo largo de una carretera cerca de Tepalcatepec, Michoacán, en una gasolinera en Tehuantepec, Oaxaca y en un terreno

baldío en el estado de Jalisco, pueden establecerse plántulas debajo de las plantas madre. Sin embargo, esta reproducción se observa únicamente en zonas antrópicamente perturbadas. Si bien parece poco probable que se vuelva una maleza, nuestro mapeo del clima ideal para la moringa también ofrece una guía para los lugares donde una tendencia invasora sería más probable.

En el contexto del potencial invasor de la moringa es muy importante utilizar la terminología correcta para describir su situación en el país, para enfatizar que la planta nunca ha sido observada invadiendo hábitats naturales. Las plantas, por atractivas o apreciadas que sean, que logran invadir hábitats naturales, seminaturales o incluso humanos, pueden considerarse como malezas invasoras que pueden dañar a las comunidades bióticas de México. Tal es el caso de los eucaliptos, el pirul o la caña gigante, *Arundo donax* L. Hablar de la moringa como «naturalizada» (por ejemplo, Ijarotimi, Adeoti y Ariyo, 2013; Pandey, Pradheep, Gupta, Roshini-Nayar y Bhandari, 2010; Sánchez-Machado, Núñez-Gastélum, Reyes-Moreno, Ramírez-Wong y López-Cervantes, 2010; Parrotta, 2009) puede hacer pensar que la especie puede presentarse como una maleza, lo cual no es correcto. Muchas veces el término «naturalizado» traslapa su significado con términos como «planta invasora» y «maleza» (Colautti y MacIsaac, 2004; Richardson et al., 2000). Esta confusión no es deseable, pues puede tener repercusiones en cuanto a la legislación que concierne el movimiento e importación de la planta y de sus productos. En Australia, por ejemplo, la planta está erróneamente clasificado como «naturalizada» (Groves et al., 2003), con el resultado de que el servicio de sanidad agrícola de ese país ha colocado a *M. oleifera* y *M. stenopetala* en su lista de plantas prohibidas. Esto quiere decir que es imposible importar y transportar *Moringa* y sus partes en Australia, una restricción innecesaria que impide el aprovechamiento y la investigación de estas especies. Por lo tanto, la distinción entre la designación correcta de la moringa como una planta introducida y su designación incorrecta como una planta naturalizada va mucho más allá de una distinción meramente terminológica.

Sin embargo, hay otros aspectos del efecto de la moringa sobre hábitats naturales que conviene destacar. El interés por cultivarla podría llegar a ser un factor altamente destructivo si se decidiera realizar esta actividad en áreas con bosque tropical caducifolio intacto, uno de los tipos de vegetación con mayor endemismo en México (Villaseñor y Ortiz, 2014) y que se considera esencial para conservar la flora nativa de México. Además de su alto nivel de endemismo, este tipo de vegetación ha dado al mundo varias de sus plantas más útiles, entre ellas el maíz, el frijol, la calabaza y los chiles. A pesar de su riqueza e importancia cultural, la mayoría del bosque tropical caducifolio en México ha sido destruido o fuertemente perturbado (Trejo y Dirzo, 2000). Por ejemplo, en toda la costa del Pacífico mexicano quedan únicamente 2 manchones grandes de este tipo de bosque, en la zona de Chamela, Jalisco y en la zona de Huatulco, Oaxaca. Por lo tanto, de ninguna forma se debería contemplar la tala de bosque nativo para el cultivo de la moringa. Por el contrario, debido a que se trata de una planta tolerante a ambientes antrópicos, su cultivo sería más adecuado en zonas agrícolas

preexistentes y también para el aprovechamiento de zonas degradadas.

En resumen, México cuenta con una extensión amplia del clima tropical seco ideal para el cultivo de la moringa. La mayoría de las áreas con este clima se encuentran en la costa del Pacífico tropical y en la depresión del río Balsas, pero también parece haber algunas zonas en la vertiente del golfo de México. Todas las zonas ideales para el cultivo de la moringa están en alturas menores de 600 m snm, presentan temperaturas mínimas relativamente altas (23 °C como mínimo promedio e idealmente unos 10 °C como mínimo absoluto), una precipitación baja a moderada (< 1 m) y con una estación larga de sequía. La identificación de la distribución geográfica del clima ideal para la moringa permite no solo elegir las zonas más propicias para su cultivo, sino también tomar las medidas necesarias para su cultivo en el caso de áreas con climas subóptimos. De igual importancia, hemos identificado las zonas del país más importantes para vigilar la moringa para evidencia de invasión de hábitats naturales. Todos estos elementos son esenciales para el desarrollo informado de este recurso biótico que es desde ya hace siglos parte integral del patrimonio biológico de México.

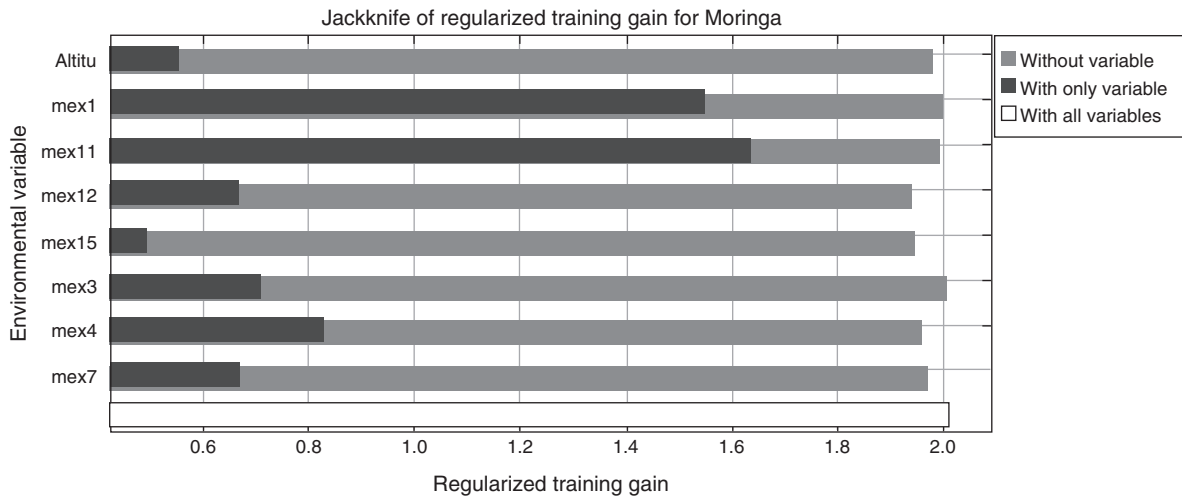
Material suplementario

Análisis de las contribuciones de las variables.

La siguiente tabla da una estimación heurística de las contribuciones relativas de las variables ambientales en el modelo de Maxent.

Variable	Porcentaje de contribución
MEX11 Temperatura media del trimestre más frío	77.6
MEX15 Estacionalidad de la precipitación	8
MEX12 Precipitación anual	5.4
MEX7 Intervalo de temperatura anual	2.5
MEX1 Temperatura media anual °C	2.5
MEX4 Estacionalidad de temperatura	2.4
Altitud	1.2
MEX3 Isotermalidad	0.4

El siguiente gráfico muestra los resultados de la prueba de Jackknife, que da una manera de examinar la importancia relativa de las variables. Como quizás no es de sorprenderse dado el conocimiento acerca de la biología altamente termófila de la planta, la variable ambiental con ganancia más alta cuando se utiliza de manera aislada es MEX11 (Temperatura media del trimestre más frío), que por lo tanto parece tener la información más útil. La variable ambiental que disminuye la ganancia cuando se omite es MEX12 (Precipitación anual), y por lo tanto parece tener mucha de la información que no está presente en las otras variables.



Agradecimientos

Agradecemos el apoyo del proyecto IT200515 «Estudios aplicados en el “árbol milagro” *Moringa*» del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la Universidad Nacional Autónoma de México y a los revisores anónimos y editores de este manuscrito.

Anexo 1. Estados de la República Mexicana y los respectivos municipios en donde la proyección del modelo fue igual o mayor al 50% de probabilidad de encontrar las condiciones adecuadas para el cultivo de *Moringa oleifera*. Los estados se enlistan por orden alfabético y los números de los municipios corresponden a las figuras 2 y 3.

Campeche: 1. Champotón, 2. Campeche, 3. Tenabo, 4. Hecelchakán, 5. Calkini; **Chiapas:** 1. Arriaga, 2. Tonalá, 3. Mazatán, 4. Tapachula, 5. Suchiate, 6. Frontera Hidalgo; **Colima:** 11. Manzanillo, 12. Armería, 13. Tecomán, 14. Coquimatlán, 15. Ixtlahuacán, 16. Colima; **Estado de México:** 1. Luvianos-Tejupilco, 2. Amatepec, 3. Tlatlaya; **Guerrero:** 1. La Unión de Isidoro Montes de la Oca, 2. José Azueta, 3. Petatlán, 4. Tecpan de Galeana, 5. Atoyac de Álvarez, 6. Benito Juárez, 7. Coyuca de Benítez, 8. Acapulco de Juárez, 9. Chilpancingo de los Bravos, 10. Juan R. Escudero, 11. Mochitlán, 12. Quechultenango, 13. Tecoanapa, 14. San Marcos, 15. Ayutla de los Libres, 16. Florencio Villareal, 17. Cuauhtepic, 18. Copala, 19. San Luis Acatlán, 20. Azoyú, 21. Cuajinicuilapa, 22. Iguala, 23. Metlatónoc, 24. Ometepec, 25. Xochistlahuaca, 26. Coahuayutla de José María Izazaga, 27. Zirándaro, 28. Coyuca de Catalán, 29. Ajuchitlán del Progreso, 30. Pungarabato, 31. Tlapehuala, 32. Cutzamala de Pinzón, 33. Tlachapa, 34. San Miguel Totolapan, 35. Arcelia, 36. General Canuto A. Neri, 37. Teloloapan, 38. Apaxtla, 39. General Heliodoro Castillo, 40. Cuetzalan del Progreso, 41. Cocula, 42. Eduardo Neri, 43. Iguala de Independencia, 44. Buenavista de Cuéllar, 45. Tepcoacuilco de Trujano, 46. Mártir de Cuilapan, 47. Huitzaco de los Figueroa, 48. Atenango del Río, 49. Copalillo, 50. Zitlala, 51. Ahuacuotzingo, 52. Olinalá; **Jalisco:** 1. Cabo Corrientes,

2. Tomatlán, 3. Villa Purificación, 4. La Huerta, 5. Cihuatlán, 6. Pihuamo, 7. Jilotlán de Dolores, 8. Santa María del Oro, 9. Hostotipaquillo, 10. Tequila; **Michoacán:** 1. Coahuayana, 2. Aquila, 3. Arteaga, 4. Lázaro Cárdenas, 5. Chinicuila, 6. Coalcomán de Vázquez Pallares, 7. Aguililla, 8. Tumbiscatio, 9. Tepalcatepec, 10. Buenavista, 11. Apatzingán, 12. Parácuaro, 13. Múgica, 14. Gabriel Zamora, 15. Nuevo Urecho, 16. La Huacana, 17. Churumuco, 18. Uruapan, 19. Taretan, 20. Ario, 21. Turicato, 22. Huetamo, 23. Tacámbaro, 24. Nocupétaro, 25. Carácuaro, 26. San Lucas, 27. Tiquicheo de Nicolás Romero, 28. Madero, 29. Tzitzio, 30. Tuzantla; **Morelos:** 4. Mazatepec, 5. Amacuzac, 6. Puente de Ixtla, 7. Jojutla, 8. Tlalquintenango, 9. Tlaltizapan, 10. Ayala, 11. Axochiapa; **Nayarit:** 17. Ixtlán del Río, 18. Ahuacatlán, 19. Jala; **Oaxaca:** 1. Santiago Tapextla, 2. Santo Domingo Armenta, 3. Santa María Cortijo, 4. San Juan Bautista Lo de Soto, 5. Santiago Llano Grande, 6. Mártires de Tacubaya, 7. San Juan Cacahuatpec, 8. San Sebastián Ixcapa, 9. San Antonio Tepetlapa, 10. San Pedro Jicaya, 11. San Miguel Tlacamama, 12. San José Estancia Grande, 13. Santiago Pinotepa Nacional, 14. San Andrés Huaxpaltepec, 15. Santa María Huazolotitlán, 16. Santiago Jamiltepec, 17. Santiago Tetepec, 18. Tataltepec de Valdés, 19. Villa de Tututepec de Melchor Ocampo, 20. Santa Catarina Juquila, 21. Santos Reyes Nopala, 22. San Pedro Mixtepec, 23. Santa María Colotepec, 24. San Baltazar Loxicha, 25. San Bartolomé Loxicha, 26. Santa María Tonameca, 27. Santo Domingo de Morelos, 28. San Agustín Loxicha, 29. Candelaria Loxicha, 30. San Pedro Pochutla, 31. Santa María Huatulco, 32. San Miguel del Puerto, 33. San Carlos Yautepec, 34. San Pedro Huamelula, 35. Santiago Astata, 36. Santo Domingo Tehuantepec, 37. San Miguel Tenango, 38. Magdalena Tequisistlán, 39. Santa María Jalapa del Marqués, 40. Santa María Mixtequilla, 41. Santiago Lachiguiri, 42. Magdalena Tlacotepec, 43. Santiago Laollaga, 44. San Pedro Comitancillo, 45. Santo Domingo Chihuitán, 46. Ciudad Ixtepec, 47. Asunción Ixtaltepec, 48. San Blas Atempa, 49. Salina Cruz, 50. San Pedro Huilotepec, 51. San Mateo del Mar, 52. Santa maría Xadani, 53. El Espinal, 54. Juchitán de Zaragoza, 55. Unión Hidalgo, 56. Santo Domingo Ingenio, 57. San Miguel Chimalapa, 58. Santiago Niltepec, 59. San Dionisio del Mar, 60. San Francisco del Mar, 61. San Francisco Ixhuatán, 62. Reforma de Pineda, 63. Santo Domingo

Zanatepec, 64. San Pedro Tapanatepec; **Puebla:** 12. Jolalpan, 13. Teotlalco, 14. Huehuetlán el Chico, 15–17. Cohetzala, 18. Chiautla, 19. Xicotlán, 20. Ixcamilpa de Guerrero; **Quintana Roo:** Othón P. Blanco; **Veracruz:** 1. Actopan, 2. Úrsulo Galván, 3. Puente Nacional, 4. Paso de Ovejas, 5. La Antigua, 6. Veracruz, 7. Manlio Fabio Altamirano, 8. Medellín, 9. Jamapa, 10. Alvarado, 11. Ignacio de la Llave, 12. Acula; **Yucatán:** 6. Halachó, 7. Maxcanú, 8. Celestún, 9. Chochol, 10. Samahil, 11. Kinchil, 12. Tetiz, 13. Hunucm, 14. Uman, 15. Ucú, 16. Mérida, 17. Progreso, 18. Chicxulub Pueblo, 19. Conkal.

Referencias

- Alvarado-Cárdenas, L. O., Martínez-Meyer, E., Feria, T. P., Eguiarte, L. E., Hernández, H. M., Midgley, G., et al. (2013). To converge or not to converge in environmental space: Testing for similar environments between analogous succulent plants of North America and Africa. *Annals of Botany*, *111*, 1125–1138.
- Aschmann, H. (1957). The introduction of date palms into Baja California. *Economic Botany*, *11*, 174–177.
- Beaumont, L. J., Hughes, L. y Poulsen, M. (2005). Predicting species distributions: Use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions. *Ecological Modelling*, *186*, 251–270.
- Bharali, R., Tabassum, J. y Azad, M. R. H. (2003). Chemomodulatory effect of *Moringa oleifera*, Lam., on hepatic carcinogen metabolizing enzymes, antioxidant parameters and skin papillomagenesis in mice. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, *4*, 131–139.
- Colautti, R. I. y MacIsaac, H. J. (2004). A neutral terminology to define 'invasive' species. *Diversity and Distributions*, *10*, 135–141.
- Coneval (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social). (2010). *La pobreza por ingresos en México*. México, D.F.: Coneval.
- Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., López-Mata, L. y Ortiz, E. (2012). Potential distribution of humid mountain forest in Mexico. *Botanical Sciences*, *90*, 331–340.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., et al. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, *29*, 129–151.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. y Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, *17*, 43–57.
- ESRI. (2006). ArcGIS 9.3. CD. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- Fahey, J. W., Dinkova-Kostova, A. T., Stephenson, K. K. y Talalay, P. (2004). The "Prochaska" microtiter plate bioassay for inducers of NQO1. *Methods in Enzymology*, *382*, 244–258.
- Fahey, J. W., Zalcman, A. T. y Talalay, P. (2001). The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry*, *56*, 5–51.
- Franklin, J. (2009). *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Fuglie, L. J. (Ed.). (2001). *The miracle tree: the multiple attributes of Moringa*. Nueva York, Wageningen, Países Bajos: Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation.
- González-Guinea, A. (2008). *Estudio etnobotánico de los huertos familiares en Xochipala, Guerrero*. Tesis. Ciudad de México: Facultad de Ciencias, UNAM.
- Groves, R. H., Hosking, J. R., Batiannoff, G. N., Cooke, D. A., Cowie, I. D., Johnson, R. W., et al. (2003). *Weed categories for natural and agricultural ecosystem management*. Canberra: Department of Agriculture, Fisheries, and Forestry.
- Heikkinen, R. K., Luoto, M., Araújo, M. B., Virkkala, R., Thuiller, W. y Sykes, M. T. (2006). Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography*, *30*, 751–777.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, *25*, 1965–1978.
- Ijarotimi, O. S., Adeoti, O. A. y Ariyo, O. (2013). Comparative study on nutrient composition, phytochemical, and functional characteristics of raw, germinated, and fermented *Moringa oleifera* seed flour. *Food Science and Nutrition*, *70*, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1002/fsn3>
- Inegi (2013). Localidades geoestadísticas. Recuperado el 7 febrero, 2014 de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/consulta_localidades.aspx
- Kibazohi, O. y Sangwan, R. S. (2011). Vegetable oil production potential from *Jatropha curcas*, *Croton megalocarpus*, *Aleurites moluccana*, *Moringa oleifera* and *Pachiraglabra*: assessment of renewable energy resources for bio-energy production in Africa. *Biomass and Bioenergy*, *35*, 1352–1356.
- Lea, M. (2010). Bioremediation of turbid surface water using seed extract from *Moringa oleifera* Lam. (drumstick) tree. *Current Protocols in Microbiology*, *1G*–2
- Liu, C., Berry, P. M., Dawson, T. P. y Pearson, R. G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, *28*, 385–393.
- Liu, C., White, M. y Newell, G. (2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, *40*, 778–789.
- Lomeli-Ramírez, L. (2009). *Evaluación nutritiva y toxicológica de la flor de moringa (Moringa oleifera) consumida en el municipio de Santa María Colotepec, Oaxaca*. Tesis. Ciudad de México: Facultad de Química, UNAM.
- Martínez, M. (1959). *Plantas útiles de la flora mexicana*. México, D.F.: Botas.
- Miller, A. J. y Knouft, J. H. (2006). GIS-based characterization of the geographic distributions of wild and cultivated populations of the Mesoamerican fruit tree *Spondias purpurea* (Anacardiaceae). *American Journal of Botany*, *93*, 1757–1767.
- Murakami, A., Kitazono, Y., Jiwajinda, S., Koshimizu, K. y Ohigashi, H. (1998). Niaziminin, a thiocarbamate from the leaves of *Moringa oleifera*, holds a strict structural requirement for inhibition of tumor-promoter-induced Epstein-Barr virus activation. *Planta Medica*, *64*, 319–323.
- Ndong, M., Uehara, M., Katsumata, S. y Suzuki, K. (2007). Effects of oral administration of *Moringa oleifera* Lam on glucose tolerance in Goto-Kakizaki and Wistar rats. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, *40*, 229–233.
- Olson, M. E. (2010). Moringaceae. Flora of North America. En Editorial Committee (Ed.), *Flora of North America* (Vol. 7) (pp. 167–169). San Luis, Missouri: Missouri Botanical Garden.
- Olson, M. E. y Fahey, J. W. (2011). *Moringa oleifera*: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *82*, 1071–1082.
- Pacheco-Olvera, R.M. (2006). *Análisis del intercambio de plantas entre México y Asia de los siglos XVI al XIX*. Tesis de maestría en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad de México.
- Pandey, A., Pradheep, K., Gupta, R., RoshiniNayar, E. y Bhandari, D. C. (2010). 'Drumstick tree' (*Moringa oleifera* Lam.): a multipurpose potential species in India. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *58*, 453–460. <http://dx.doi.org/10.1007/s10722-010-9629-6>
- Parrotta, J. A. (2009). *Moringa oleifera* Lam. 1785. En A. Roloff, H. Weisgerber, U. Lang, y B. Stimm (Eds.), *Enzyklopädie der Holzgewächse, Handbuch und Atlas der Dendrologie* (pp. 1–8). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Peterson, A. T., Soberon, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., et al. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton, Nueva Jersey: Princeton University Press.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, *190*, 231–259.
- Richardson, D. M., Pyšek, P., Rejmánek, M., Barbour, M. G., Panetta, F. D. y West, C. J. (2000). Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions*, *6*, 93–107.
- Sánchez-Machado, D. I., Núñez-Gastélum, J. A., Reyes-Moreno, C., Ramírez-Wong, B. y López-Cervantes, J. (2010). Nutritional quality of edible parts of *Moringa oleifera*. *Food Analytical Methods*, *3*, 175–180.

- Trejo, I. y Dirzo, R. (2000). Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation*, 94, 133–142.
- Trejo, L., Feria-Arroyo, T. P., Olsen, K., Eguiarte, L. E., Arroyo, B., Gruhn, J. A., et al. (2012). Poinsettia's wild ancestor in the Mexican dry tropics: historical, genetic, and environmental evidence. *American Journal of Botany*, 99, 1146–1157.
- Trethowan, R. M., Reynolds, M. P., Ortiz-Monasterio, J. I. y Ortiz, R. (2007). The genetic basis of the Green Revolution in wheat production. *Plant Breeding Reviews*, 28, 39.
- Villaseñor, J. L. y Ortiz, E. (2014). Biodiversidad de las plantas con flores (División Magnoliophyta) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad, Suplem.*, 85, 134–142.