

## Distribución geográfica potencial de papaya silvestre cultivada en México

Edgar Espinosa Trujillo<sup>1</sup>  
Alfredo Josué Gámez Vázquez<sup>2</sup>  
Miguel Angel Avila Perches<sup>2</sup>  
Francisco Palemón Alberto<sup>3</sup>  
Jesus Hernández Ruiz<sup>1§</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato-División de Ciencias de la Vida. Carretera Irapuato-Silao km 9, Exhacienda El Copal, Irapuato, Guanajuato, México. CP 36500. (e.espinosa@ugto.mx). <sup>2</sup>Campo Experimental Bajío-INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende km 6.5, Celaya, Guanajuato, México. CP 38110. Tel. 01(800) 0882222, ext. 85220 y 85228. (ajosueg@msn.com; aperchesm@yahoo.com.mx). <sup>3</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales-Universidad Autónoma de Guerrero. Periférico Poniente s/n, Iguala de la Independencia, Guerrero. CP. 40000. (alpaf75@hotmail.com).

§Autor para correspondencia: hernandez.jesus@ugto.mx.

### Resumen

Las poblaciones silvestres de papaya (*Carica papaya* L.) integran un recurso biológico para el mejoramiento genético de la especie. La predicción de la distribución geográfica de las poblaciones silvestres y cultivadas es una herramienta útil para determinar sitios de colecta para su uso y conservación. Con el objetivo de estimar la distribución potencial de papaya en México, se elaboró una base de datos con información de geo-referenciación de individuos de papaya silvestre y cultivados, posteriormente se aplicó el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt) con 22 variables bioclimáticas como predictores. El área total de la distribución potencial de los especímenes silvestres fue de 114 546.5 km<sup>2</sup>, las áreas de alto potencial se ubicaron en el Golfo de México (sur de Veracruz, Tabasco, Campeche) y en la costa de Chiapas. La papaya cultivada presentó una distribución potencial alta en tres zonas: sur de Veracruz, costa de Chiapas y norte de Guerrero, conformando 185 396.9 km<sup>2</sup>. Las variables que más contribuyeron en el modelo para estimar la distribución potencial de papaya silvestres fueron: temperatura mínima promedio del periodo más frío (33%), temperatura promedio anual (20%) y régimen de humedad del suelo (13%), para la distribución de cultivares las variables más importantes fueron: temperatura mínima promedio del periodo más frío (41%), precipitación del cuatrimestre más lluvioso (19%) y precipitación anual (11%). Los factores ambientales temperatura y precipitación pluvial, fueron comunes en la predicción de distribución de ambos tipos de papaya en México.

**Palabras clave:** distribución potencial, maxent, recurso fitogenético.

Recibido: julio de 2018

Aceptado: septiembre de 2018

## Introducción

En México la familia Caricaceae está representada por ocho especies de los géneros *Carica*, *Horovitzia*, *Jacaratia*, *Jarilla* y *Vasconcellea* (Villaseñor, 2016). La especie *Carica papaya* L. es un clado confinado a México y Guatemala, cuyas poblaciones silvestres son estrictamente dioicas (plantas macho y hembra), en contraste, las cultivadas son trioicas (machos, hembras y hermafroditas) (Carvalho y Renner, 2012). Las diferencias morfológicas de variedades y razas, respecto a las silvestres, son evidentes principalmente, en características de la fruta (Fuentes y Santamaría, 2014; Manshardt, 2014).

La papaya se localiza al este de Mesoamérica, desde la península de Yucatán (México) hasta Costa Rica (Scheldeman *et al.*, 2011). Se asume que fueron los españoles, en el siglo XVI, quienes ampliaron su distribución más allá de Mesoamérica (Manshardt, 2014). En México, la presencia de papaya silvestre y cultivada no se ha documentado en siete estados de la república (Baja California, Ciudad de México, Coahuila, Durango, Guanajuato, Nuevo León y Tlaxcala), de las 32 entidades federativas, de acuerdo con los listados botánicos publicados por Villaseñor (2016). Las poblaciones silvestres regularmente se encuentran en las tierras bajas de aquellos estados que colindan con el Golfo de México (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche), la península (Campeche, Yucatán y Quintana Roo) y en los colindantes con el Océano Pacífico (Guerrero, Oaxaca y Chiapas) (Chávez y Núñez, 2016), caracterizados por climas cálidos.

Para determinar la distribución de las poblaciones silvestres de especies de plantas, en forma precisa, se han desarrollado algoritmos computacionales que, con base en los sistemas de información geográfica climática y edáfica, ofrecen la posibilidad de caracterizar, identificar y representar los nichos ecológicos con mayor probabilidad de encontrarlas (Phillips *et al.*, 2004) además, de tener múltiples aplicaciones en el ámbito de la conservación, como la identificación de áreas y zonas para especies con problemas de conservación (Hernandez-Ruiz *et al.*, 2016; Qin *et al.*, 2017). En este sentido, conociendo la distribución potencial de la especie, es factible generar acciones de conservación, definir zonas ecológicas de dispersión o de selección de germoplasma a incluir en programas de mejoramiento genético (Scheldeman y van Zonneveld, 2010), lo que puede ser importante para especies de importancia económica como la *Carica papaya*.

Se ha aplicado el software FloraMap para determinar zonas de distribución de especies del género *Vasconcellea* (Caricaceae), para posteriormente coleccionar material reproductivo y definir patrones de adaptación en determinadas regiones geográficas en Venezuela (Rodríguez *et al.*, 2005). Con objetivo similar, para 21 especies de este mismo género se ha usado el software DIVA-GIS, incluyendo 19 variables climáticas y 1 702 sitios georeferenciados en centro y sudamérica (Scheldeman *et al.*, 2007). Sin embargo, se considera que con el método MaxEnt es factible modelar la distribución potencial de una especie, dado que ignora sesgo de muestreo y predice la distribución geográfica potencial con datos de presencia de las plantas, complementados con variables predictoras continuas y categóricas (Scheldeman y van Zonneveld, 2010; Merow *et al.*, 2016).

En este sentido, al conocer la distribución geográfica de la diversidad genética y morfológica de *Carica papaya* L., se sientan las bases para la recolecta de poblaciones, sobre todo silvestres, que son fuente de genes útiles para mejorar el rendimiento y la calidad nutricional de los frutos en

cultivares comerciales (Rodríguez *et al.*, 2014). Por tal razón, en el presente trabajo se planteó el objetivo de estimar la distribución potencial de cultivares y poblaciones silvestres de papaya en México usando el algoritmo computacional de predicción MaxEnt.

## Materiales y métodos

### Base de datos

Se elaboró una base de datos con localizaciones geográficas que indican la presencia de *C. papaya* L. en diversos sitios de México en la hoja de cálculo Excel para Windows (versión 10), de acuerdo con Scheldeman y van Zonneveld (2010). Se georeferenciaron individuos de papaya silvestre y cultivada en los estados de Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Tabasco y Chiapas. La información se recopiló con recorridos de campo en el periodo de 2013 a 2016, usando el sistema portátil de localización geográfica marca Garmin® modelo GPSMAP 64s. La identificación morfológica de la papaya silvestre y cultivada se hizo con base en las descripciones botánicas de Moreno (1980). También, se incluyeron 20 datos de georeferenciación de papayas presentes en varias entidades federativas de México (Hernández, 2013).

### Modelo de distribución potencial

Se usó el programa MaxEnt versión 3.3.3 (Phillips *et al.*, 2017) para desarrollar los análisis de acuerdo al tipo de papaya: silvestres y cultivadas (razas, variedades e híbridos). En total, en los análisis se usaron 390 sitios georeferenciados con presencia de poblaciones silvestres (208) y de cultivares (182). El número de sitios analizados con presencia de la especie (390) se consideró como un tamaño de muestra suficiente, ya que Baldwin (2009) indica que la ganancia en predicción de la distribución geográfica es aceptable con un tamaño de muestra superior a 50 sitios georeferenciados de la especie bajo estudio.

Se utilizaron 22 variables climáticas como predictores (Cuadro 1), de las cuales 19 fueron bioclimáticas de resolución espacial de 0.5 minutos de arco y fueron obtenidas de la base de datos WorldClim ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)). Los datos digitales de elevación (DEM, con 90 m de resolución) se obtuvieron del CGIAR-CSI (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Las capas en formato vectorial de uso de suelo y vegetación se tomaron de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1998), y el régimen de humedad del suelo de Maples (1992). Las tres últimas variables empleadas se consideraron debido a que son factores importantes del espacio físico en que habita la especie (Challenger y Caballero, 1998). También se descartaron las superficies agrícolas y pecuarias en la estimación de la distribución potencial.

**Cuadro 1. Variables ambientales y bioclimáticas utilizadas para determinar la distribución geográfica potencial de *C. papaya* L. en México.**

Código	Descripción de variable	Unidades
BIO01	Temperatura promedio anual	(°C)
BIO02	Oscilación diurna de la temperatura	(°C)
BIO03	Isotermalidad	Adimensional
BIO04	Estacionalidad de la temperatura	CV

Código	Descripción de variable	Unidades
BIO05	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido	(°C)
BIO06	Temperatura mínima promedio del periodo más frío	(°C)
BIO07	Oscilación anual de la temperatura	(°C)
BIO08	Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso	(°C)
BIO09	Temperatura promedio del cuatrimestre más seco	(°C)
BIO10	Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido	(°C)
BIO11	Temperatura promedio del cuatrimestre más frío	(°C)
BIO12	Precipitación anual	(mm)
BIO13	Precipitación del periodo más lluvioso	(mm)
BIO14	Precipitación del periodo más seco	(mm)
BIO15	Estacionalidad de la precipitación	CV
BIO16	Precipitación del cuatrimestre más lluvioso	(mm)
BIO17	Precipitación del cuatrimestre más seco	(mm)
BIO18	Precipitación del cuatrimestre más cálido	(mm)
BIO19	Precipitación del cuatrimestre más frío	(mm)
BIO20	Altitud	(m)
BIO21	Régimen de humedad del suelo*	Tipos
BIO22	Vegetación	Tipos

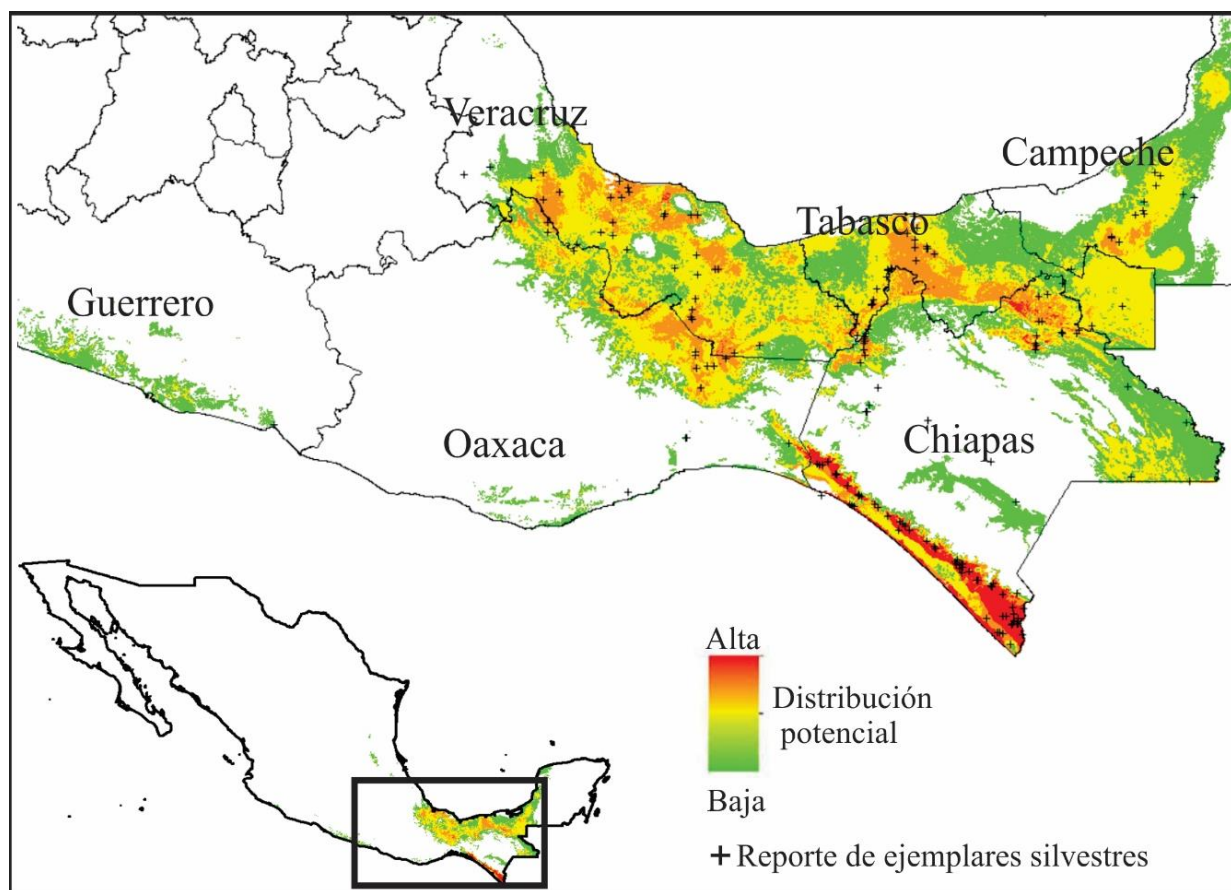
CV= coeficiente de variación; \*= para este dato se tomó la clasificación climática de Thornwaite donde se reconocen cuatro regímenes de humedad del suelo en el territorio mexicano: Árido, Xérico, Ústico y Ácuico.

## Resultados y discusión

### Distribución potencial de papaya silvestre

La papaya silvestre se distribuye en el bosque lluvioso de México, y se localiza principalmente en la vegetación secundaria del bosque tropical húmedo y subhúmedo (Paz y Vázquez, 1998). Además de los factores bioclimáticos, su distribución en Centro y Sudamérica se ha favorecido por la abundante cantidad de semillas que producen las plantas y la prolongada viabilidad de las semillas (Paul y Duarte, 2011).

En este análisis, la distribución potencial, basada en el registro de 208 individuos de poblaciones silvestres, generó dos zonas de probabilidad alta de encontrar este tipo de papayas: 1) El sureste del Golfo de México, comprendiendo el estado de Veracruz, Tabasco, Campeche y una parte al norte del estado del Chiapas, principalmente. En estas zonas la calidad del hábitat para la especie es de baja a moderada (Figura 1). La zona ecológica es tropical húmeda, clima predominante cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes mas frío mayor de 18 °C. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm, lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual, precipitación media anual en un intervalo de 1 500 a 2 000 mm anuales; y 2) Las costas del Pacífico del estado de Chiapas, presentan una calidad del hábitat de moderada a alta. La zona ecológica corresponde a tropical húmeda, donde el clima es cálido subhúmedo con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C.



**Figura 1. La distribución potencial de poblaciones silvestres de *Carica papaya* L.** Las zonas de alta distribución se indican en color rojo, con disminución gradual de la probabilidad hasta un nivel bajo de color verde. Las áreas de color blanco indican zonas no potenciales.

Los análisis también indicaron la existencia de zonas potenciales de menor tamaño en la costa de Oaxaca (15 172.14 km<sup>2</sup>); similarmente, en las regiones Costa Chica, Costa Grande, Centro, Norte y Tierra Caliente de Guerrero que juntas comprenden 3 171.91 km<sup>2</sup>; también en Yucatán (2 487.66 km<sup>2</sup>). Sin embargo, en estas zonas la calidad del hábitat para la especie se clasificó como baja.

Finalmente se ubicaron zonas aisladas de menor tamaño en San Luis Potosí (954.89 km<sup>2</sup>), Tamaulipas (170.22 km<sup>2</sup>), Colima (120.03 km<sup>2</sup>), y Jalisco (82.16 km<sup>2</sup>), donde también prevalecen características del trópico subhúmedo.

El área total de la distribución potencial para los especímenes silvestres fue de 114 546.5 km<sup>2</sup>. La mayor superficie potencial se localizó (Cuadro 2) en tres estados que contribuyeron con 69.1%: Chiapas (25%), Veracruz (27.6%) y Campeche (16.5%). En Chiapas, Chávez y Núñez (2016) reportan la distribución de papaya silvestre en las regiones que colindan con Tabasco, y señalan los efectos causados por la agricultura y ganadería sobre la estructura de la vegetación donde sobrevive la papaya silvestre.

**Cuadro 2. Superficie (%), por entidad federativa de la República Mexicana, de las áreas potenciales para el desarrollo de poblaciones silvestres y cultivadas de *C. papaya* L.**

Estado	Silvestres	Acumulado	Estado	Cultivares	Acumulado
Veracruz	27.6	27.6	Chiapas	25.7	25.7
Chiapas	25	52.6	Veracruz	17.5	43.2
Campeche	16.5	69.1	Guerrero	16.7	59.9
Oaxaca	13.2	82.3	Oaxaca	14.6	74.5
Tabasco	11.6	93.9	Campeche	9.8	84.3
Guerrero	2.8	96.7	Michoacán	5.6	89.9
Yucatán	2.2	98.9	Tabasco	3.8	93.7
San Luis Potosí	0.8	99.7	Jalisco	2.3	96
Colima	0.1	99.8	San Luis Potosí	1.6	97.6
Jalisco	0.1	99.9	Baja California Sur	1.2	98.8
Tamaulipas	0.1	-	Colima	0.4	99.2
Baja California Sur	0	-	Quintana Roo	0.4	99.6
Michoacán	0	-	Nayarit	0.1	99.7
Nayarit	0	-	Sinaloa	0.1	99.8
Quintana Roo	0	-	Sonora	0.1	99.9
Sinaloa	0	-	Yucatán	0	-
Sonora	0	-	Tamaulipas	0	-
Total	100%			100%	

En silvestres la superficie total (100%)= 114 546.5 km<sup>2</sup>; en cultivares la superficie total (100%)= 185 396.9 km<sup>2</sup>; - = estado no contribuyente a la distribución.

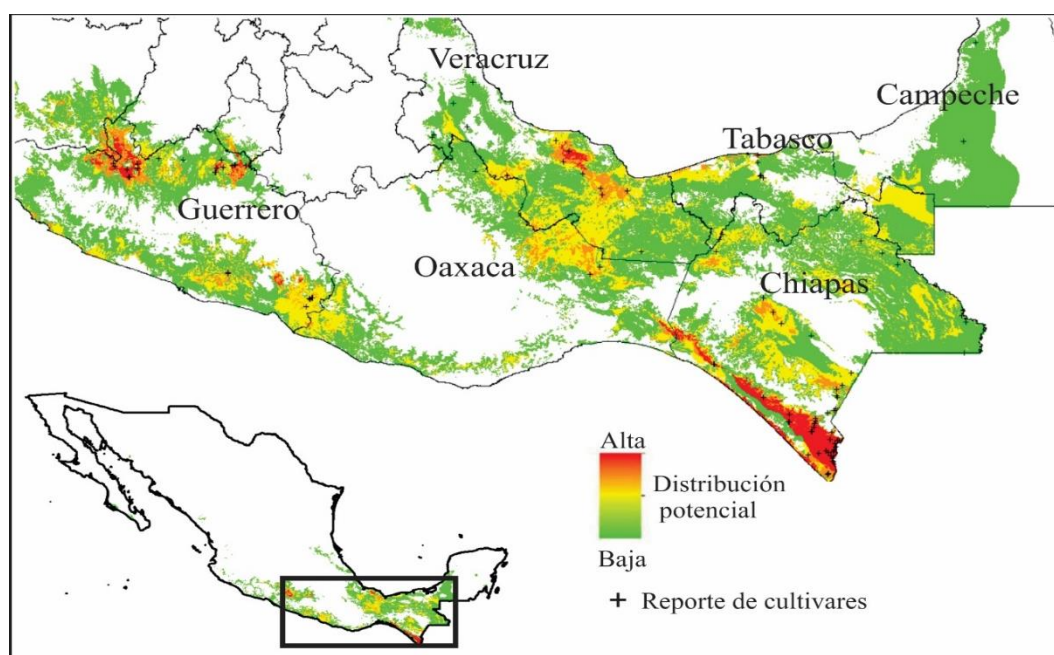
Por otro lado, las zonas de alta probabilidad de distribución geográfica de poblaciones de papaya silvestre, definidas en este estudio, se localizan parcialmente en las regiones prioritarias de conservación de la biodiversidad de México publicadas por Arriaga *et al.* (2000), como ocurre con otros grupos a los que se les ha hecho el análisis de distribución potencial (Villaseñor y Téllez, 2004), por lo que es importante validar las distribuciones potenciales con observaciones en campo. En Oaxaca las zonas de distribución potencial de papaya silvestre coinciden con la región prioritaria número 130 (Sierra del Norte de Oaxaca-Mixe) y 132 (Selva Zoque-La Sepultura); en Veracruz con las regiones prioritarias (RP) 124 (Humedales del Papaloapan) y 131 (Sierra de los Tuxtles-Laguna del Ostión); en Chiapas con las RP 133 (EL Triunfo-La Encrucijada-Palo Blanco) y 135 (Tacaná-Boquerón); en Tabasco con las RP 142 (El Manzanillal), 143 (Lagunas de Catatzajá-Emiliano Zapata) y 144 (Pantanos de Centla).

Sin embargo, existen zonas potenciales de distribución, que no están comprendidas en alguna región con prioridad de conservación; por ejemplo, en Los Tuxtles, Veracruz, Chávez *et al.* (2014) destacan que las poblaciones de papaya silvestre sobreviven en los fragmentos de vegetación con menor diversidad genética que las poblaciones presentes en las zonas de vegetación continua; además reportan que las actividades agrícolas y ganaderas causan aislamiento de poblaciones y ponen en riesgo la persistencia de las poblaciones naturales en su nicho ecológico. En Costa Rica la papaya que se desarrolla en áreas con disturbio y vegetación secundaria, puede presentar un cuello de botella genético (Brown *et al.*, 2012). Esto indica que las zonas potenciales de distribución de papaya silvestre en México, que no están incluidas en zonas de protección federal, están expuestas a actividades antropocéntricas que podrían alterar la estructura del reservorio genético.

## Distribución potencial de cultivares

Es relevante notar que la distribución de papaya cultivada se ha favorecido con el manejo agrícola y por los beneficios económicos obtenidos; en este sentido, la tecnología agronómica se ha enfocado en elevar el rendimiento de fruta y propiciando las mejores condiciones ambientales para el desarrollo de las plantas (Guzmán *et al.*, 2010). De esta forma, las variedades de papaya, que han surgido de un proceso de mejoramiento genético, se establecen como cultivo comercial en cinco estados de México líderes en su producción: Oaxaca, Chiapas, Colima, Veracruz y Michoacán (SIAP, 2016). Además de las variedades, con el tiempo los agricultores han desarrollado algunas variedades nativas que se propagan en huertos caseros o en terrenos agrícolas (Paz y Vázquez, 1998). Por ejemplo, los conocidos como ‘papaya zapote’, ‘papaya oreja de mico’, ‘papaya amarilla’, ‘papaya de monte’, están presentes en los huertos caseros en comunidades de Yucatán, Campeche y Tabasco, dado el uso alimenticio (Mariaca, 2012). Inclusive, Moo *et al.* (2017) indican que en México se está dando un proceso de sustitución de variedades nativas por variedades surgidas del mejoramiento genético; por ejemplo, por la variedad Maradol.

De acuerdo con los resultados del presente estudio, el cultivo de papaya tiene potencial en 15 estados, pero la mayor superficie se ubicó en Chiapas (25.7%), Veracruz (17.5%) y Guerrero (16.7%), que en conjunto representaron casi 60% de la superficie total (Figura 2). Estas zonas presentan características distintivas de zona ecológica tropical húmeda, con clima predominante cálido húmedo, temperatura media anual mayor a 22 °C y temperatura del mes más frío mayor a 18 °C. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm, lluvias en verano, cantidad de lluvia invernal mayor a 10.2% del total anual y la precipitación media anual está en el intervalo de 1 500 a 2 000 mm anuales.



**Figura 2. Distribución potencial de cultivares de *Carica papaya* L.** Las zonas de alta distribución se indican en color rojo, con disminución gradual de la probabilidad hasta un nivel bajo de color verde. Las áreas de color blanco indican zonas no potenciales. Los puntos de color negro son los sitios de geo referenciación.

Otras zonas potenciales del cultivo, de menor tamaño y con calidad ecológica baja se localizaron en los estados de Baja California, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, San Luis Potosí y Michoacán (imagen no presentada) en su conjunto, estas zonas sumaron 11.8% del área total de distribución potencial de cultivares de papaya (Cuadro 2).

### Variables climáticas y distribución potencial

De las 22 variables, climáticas y de suelo, utilizadas como predictores en el modelo MaxEnt de distribución geográfica de poblaciones silvestres y cultivares, ocho fueron las más importantes para explicar la distribución de *Carica papaya* en México (Cuadro 3). Las variables temperatura promedio anual (BIO01), temperatura mínima promedio del periodo más frío (BIO06), precipitación anual (BIO12) y precipitación del cuatrimestre más lluvioso (BIO16) fueron predictores comunes de la distribución de la papaya cultivada y silvestre. En relación a esto, Scheldeman *et al.* (2007) determinaron que *C. papaya* se adapta mejor en nichos de alta temperatura (24.2 °C en promedio) con poca variación estacional, y alta precipitación pluvial (1 830 mm). Por otra parte, Bradie y Leung (2017) establecen que la temperatura y la precipitación son variables ambientales que más contribuyen en la distribución de especies de plantas terrestres.

**Cuadro 3. Contribuciones (%) de las variables bioclimáticas en el modelo MaxEnt para la distribución de poblaciones silvestres y cultivadas de *Carica papaya* L. en México.**

Variable	Contribución para silvestres (%)	Acumulado (%)	Variable	Contribución para cultivares (%)	Acumulado (%)
BIO06	33	33	BIO06	41.4	41.4
BIO01	20.1	53.1	BIO16	19	60.4
BIO21	13.5	66.6	BIO12	11	71.4
BIO11	10.7	77.3	BIO19	5.1	76.5
BIO16	7.8	85.1	BIO04	4.5	81
BIO12	2.4	87.5	BIO13	2.3	83.3
BIO05	2.2	89.7	BIO01	2.2	85.5
BIO20	2.1	91.8	BIO18	2.2	87.7

En el caso de las papayas silvestres, las variables que contribuyeron con más de 75% de su distribución fueron: temperatura promedio anual (BIO01, con 20.1%), temperatura mínima promedio del mes más frío (BIO06, 33%), temperatura promedio del cuatrimestre más frío (Bio11, 10.7%) y régimen de humedad (BIO21, 13.5%). En general, es notorio que la distribución de la papaya silvestre es influenciada por la baja temperatura, el régimen de humedad del suelo y el nivel de precipitación pluvial.

Para los cultivares de papaya, las variables de mayor importancia para su distribución fueron: temperatura mínima promedio del mes más frío (BIO06, con 41.4%), precipitación del cuatrimestre más lluvioso (BIO16, 19%), precipitación pluvial anual (BIO12, 11%) y precipitación del cuatrimestre más frío (BIO19, 5.1%). Esto indica que la distribución de las papayas cultivadas en las regiones potenciales estará influenciada, en mayor magnitud, por el nivel de precipitación pluvial y las temperaturas bajas.



En el presente estudio, la temperatura mínima promedio del periodo más frío (BIO 6) fue la variable que más participó en la definición de las zonas potenciales tanto en poblaciones silvestres como en cultivares. Además, las variables climáticas que contribuyeron sustancialmente a la distribución de las silvestres fueron BIO01 (temperatura promedio anual) y BIO21 (régimen de humedad del suelo), mientras que para los cultivares fueron BIO16 (precipitación del cuatrimestre más lluvioso) y BIO12 (precipitación pluvial anual).

La temperatura tiene influencia en la germinación de semillas de papaya, cuando en el suelo oscila entre 29.5 °C y 29.8 °C durante el verano (Saran *et al.*, 2016). El crecimiento de la planta en altura y diámetro del tallo es adecuado con temperaturas superiores a 20 °C (Allan, 2002). Las temperaturas inferiores a 10 °C y superiores a 35 °C están relacionadas con desordenes del desarrollo de fruta y flores (Workneh *et al.*, 2012).

El déficit de humedad en el suelo desencadena el mecanismo de ajuste osmótico en el tejido de plántulas de papaya y la detención del crecimiento (Mahouachi *et al.*, 2006). Tales deficiencias de humedad en el suelo, en combinación con alta temperatura (>37 °C), tienen un impacto negativo en el proceso fotosintético (Liu *et al.*, 2014). Lo anterior afecta inclusive a los tipos silvestres de papaya (Díaz *et al.*, 2014).

En adición, fue notorio que la precipitación pluvial fue una variable bioclimática relevante en la distribución potencial de cultivares de papaya. Para su cultivo la disponibilidad de agua es importante, dado que las plantas producen de 1.8 a 2.8 kg de fruta fresca por metro cúbico de agua aplicada (Carr, 2014). No obstante, el exceso de agua en el suelo, por lo menos durante un día, causa problemas por falta de oxígeno en el sistema radical (Thani *et al.*, 2016).

## Conclusiones

El análisis de distribución geográfica potencial de *Carica papaya* L., mediante el algoritmo Maxent, permitió delimitar dos zonas de distribución de los tipos silvestres, con probabilidad de media a alta, la primera región en el Golfo de México que incluyó el sur del Veracruz, noreste de Oaxaca, centro de Tabasco, norte de Chiapas y suroeste de Campeche; una segunda comprendió la costa del estado de Chiapas. Estos cinco estados aportaron 93.9% de la superficie total potencial de papayas silvestres. El algoritmo también permite identificar tres áreas de distribución potencial, con alta probabilidad, de los cultivares de papaya: una primer zona en el sur de Veracruz, la segunda en el norte del estado de Guerrero y la tercera en la costa del estado de Chiapas. Estos tres estados comprendieron 59.9% de la superficie total potencial de cultivares de papaya. Las variables climáticas que contribuyeron entre 53% y 60% de la capacidad de predicción de la distribución geográfica potencial fueron: temperatura mínima promedio del periodo más frío del año, temperatura promedio anual y la precipitación del cuatrimestre más lluvioso del año.

## Literatura citada

Allan, P. 2002. *Carica papaya* responses under cool subtropical growth conditions. *Acta Hortic.* 575:757-763.

- Arriaga, L.; Espinoza, J. M.; Aguilar, C.; Martínez, E.; Gómez L. y Loa, E. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Escala de trabajo 1:1 000 000. CONABIO. México. <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Tmapa.html>.
- Baldwin, R. A. 2009. Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*. 11:854-866.
- Bradie, J. and Leung, B. 2017. Quantitative synthesis of the importance of variables used in MaxEnt species distribution models. *J. Biogeography*. 44:1344-1361.
- Brown, J. E.; Bauman, J. M.; Lawrie, J. F.; Rocha, O. J. and Moore, R. C. 2012. The Structure of morphological and genetic diversity in natural populations of *Carica papaya* (Caricaceae) in Costa Rica. *Biotropica*. 44(2):179-188.
- Carr, M. K. V. 2014. The water relations and irrigation requirements of papaya (*Carica papaya* L.): a review. *Experimental Agric.* 50(2):270-283.
- Carvalho, F. A. and Renner, S. S. 2012. A dated phylogeny of the papaya family (Caricaceae) reveals the crop's closest relatives and the family's biogeographic history. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 65:46-53.
- CONABIO. 1998. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Uso de suelo y vegetación. Escala 1:1 000 000. Modificado de: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) - Instituto Nacional de Ecología (INE). 1996. Uso del suelo y vegetación, escala 1:1 000 000. México. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usvalmgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc.html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usvalmgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc.html.xsl&_indent=no).
- Challenger, A. y Caballero, J. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: Pasado, presente y futuro. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 1ª Ed. Instituto de Biología-Universidad nacional Autónoma de México (UNAM) y agrupación Sierra Madre SC. México. 847 p.
- Chávez, P. M. and Núñez, F. J. 2016. Genetic diversity and structure of wild populations of *Carica papaya* L. in Northern Mesoamerica inferred by nuclear microsatellites and chloroplast markers. *Annals of Botany*. 118 (7):1293-1306.
- Chávez, P. M.; Suarez, M. P.; Castillo, G. and Núñez, F. J. 2014. Hábitat fragmentation threatens wild populations of *Carica papaya* L. (Caricaceae) in a lowland rainforest. *Am. J. Bot.* 101(7):1092-1101.
- Díaz, H. Y.; Torres, de la N. W.; Rodríguez, C. J. y Rodríguez, H. P. 2014. Respuesta de plantas de papaya silvestre (*Carica cubensis* Solms) al estrés hídrico y su recuperación: aspectos fisiológicos y del crecimiento. *Cultivos Tropicales*. 35(3):55-61.
- Fuentes, G. and Santamaría, J. M. 2014. Papaya (*Carica papaya* L.): origin, domestication, and production. In: Ming, R. and Moore, P. H. (Eds.). *Genetics and genomics of papaya*. Springer Science Business Media, New York, USA. 3-15 pp.
- Guzmán, R. E.; Gómez, Á. R.; Pat, F. J. M.; Pohlman, H. A. J.; Álvarez, R. J. C.; Geissen, V.; Mirafuentes, F. and Ramos, R. 2010. Agronomic, economic and ecological aspects of the papaya (*Carica papaya* L.) production in Tabasco, Mexico. *Afr. J. Plant Sci.* 4(4):99-106.
- Hernández, R. J.; Herrera, C. B. E.; Delgado, A. A.; Salazar, R. V. M.; Bustamante, G. Á.; Campos, C. J. E. and Ramírez, J. J. 2016. Distribución potencial y características geográficas de poblaciones silvestres de *Vanilla planifolia* (Orchidaceae) en Oaxaca, México. *Rev. Biol. Trop.* 64(1):252-262.

- Hernández, S. G. 2013. Diversidad morfológica de accesiones de papayo (*Carica papaya* L.) provenientes de tres estados de México. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. 95 p.
- Liu, M.; Zhang, Z.; Gao, H.; Yang, C.; Fan, X. and Cheng, D. 2014. Effect of leaf dehydration duration and dehydration degree on PSII photochemical activity of papaya leaves. *Plant Physiol. Biochem.* 82:85-88.
- Mahouachi, J.; Rosa, S. A. and Talon, M. 2006. Responses of papaya seedlings (*Carica papaya* L.) to water stress and re-hydration: growth, photosynthesis and mineral nutrient imbalance. *Plant and Soil.* 281:137-146.
- Manshardt, R. 2014. History and future of the Solo Papaya. *In: Ming, R. and Moore, P.H. (Eds.). Genetics and genomics of papaya.* Springer Science Business Media, New York, USA. 95-113 pp.
- Maples, V. M. 1992. Regímenes de humedad del suelo en Hidrogeografía IV.6.2 Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rehsu4mgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc.html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rehsu4mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc.html.xsl&_indent=no).
- Mariaca, M. R. 2012. El huerto familiar del sureste de México. 1ª Ed. Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental del Estado de Tabasco, El Colegio de la Frontera Sur, Chiapas, México. 551 p.
- Merow, C.; Allen, J. M.; Aiello, L. M. and Silander, J. A. 2016. Improving niche and range estimates with Maxent and point process models by integrating spatially explicit information. *Global Ecol. Biogeography.* 25:1022-1036.
- Moo, A. R. D.; Munguía, R. M. A.; Serralta, L. P.; Castillo, B. M. T.; Vega, F. R. and Martínez, N. D. 2017. Can the introduction of modern crop varieties in their centre of origin affect local ecological knowledge? A case study of papaya in the Yucatan peninsula. *Human Ecol.* 45:367-375.
- Moreno, P. N. 1980. Flora de Veracruz. Caricaceae. Fascículo 10. Instituto Nacional de Investigaciones de Recursos Bióticos. Xalapa, Veracruz. México. 17 p.
- Paul, R. E. and Duarte, O. 2011. Tropical fruits. 1(2<sup>nd</sup> Ed.). CABI. Wallingford, U. K. 400 p.
- Paz, L. and Vázquez, C. Y. 1998. Comparative seed ecophysiology of wild and cultivated *Carica papaya* trees from a tropical rain forest region in Mexico. *Tree Physiology.* 18:277-280.
- Phillips, S. J.; Anderson, R. P.; Dudík, M.; Schapire, R. E. and Blair, M. E. 2017. Opening the black box: an open-source release of MaxEnt. *Ecography.* 40:887-893.
- Phillips, S. J.; Dudík, M. and Schapire, R. E. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *In: proceedings of the twenty-first international conference on machine learning.* ACM Press, New York, USA. 655-662 pp.
- Qin, A.; Liu, B.; Guo, Q.; Bussmann, R. W.; Ma, F.; Jian, Z. and Pei, S. 2017. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecol. Conservation.* 10:139-146.
- Rodríguez, C. J.; Díaz, H. Y.; Pérez, G. A.; Natali, C. Z. y Rodríguez, H. P. 2014. Evaluación de la calidad y el rendimiento en papaya silvestre (*Carica papaya* L.) de Cuba. *Cultivos Tropicales.* 35(3):36-44.
- Rodríguez, D.; Marín, C.; Quecan, H. y Ortiz, R. 2005. Áreas potenciales para colectas del género *Vasconcellea* Badillo en Venezuela. *Bioagro.* 17(1):3-10.

- Saran, P. L.; Choudhary, R.; Singh, S. I. and Ercisli, S. 2016. Influence of temperature on seed germination in papaya under subtropical conditions of India. *Erwerbs Obstbau*. 58:199-202.
- Scheldeman, X.; Willemen, L.; Coppens, d'E. G.; Romeijn, P. E.; Restrepo, M. T.; Romero, M. J.; Jiménez D.; M. Lobo;. Medina, C. I.; Reyes, C.; Rodríguez, D.; Ocampo, J. A.; Van Damme, P. and Goetgebeur, P. 2007. Distribution, diversity and environmental adaptation of highland papayas (*Vasconcellea* spp.) in tropical and subtropical America. *Biodiversity Conservation*. 16:1867-1884.
- Scheldeman, X. and van Zonneveld, M. 2010. Training manual on spatial analysis of plant diversity and distribution. Biodiversity International, Rome, Italy. 179 p.
- Scheldeman, X.; Kyndt, T.; Coppens, d'E. G.; Ming, R.; Drew, R.; Van Droogenbroeck, B.; Van Damme, P. and Moore, P. H. 2011. *Vasconcellea*. In: Kole, C. (Ed.). Wild crop relatives: Genomic and breeding resources, tropical and subtropical fruits. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 213-249 pp.
- SIAP. 2016. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Avance de siembras y cosechas. Resumen por estado. <http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola-siap-gobmx/resumenproducto.do>.
- Thani, Q. A.; Schaffer, B.; Liu, G.; Vargas, A. I. and Crane, J. H. 2016. Chemical oxygen fertilization reduces stress and increases recovery and survival of flooded papaya (*Carica papaya* L.) plants. *Scientia Hortic*. 202:173-183.
- Villaseñor, J. L. 2016. Checklist of the native vascular plants of México. *Rev. Mex. Biod.*. 87:559-902.
- Villaseñor, J. L. y Téllez, V. O. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. *Anales del Instituto de Biología Serie Botánica*. 75(2):205-220.
- Workneh, T. S.; Azene, M. and Tesfay, S. Z. 2012. A review on the integrated agro-technology of papaya fruit. *Afr. J. Biotechnol*. 11(85):15098-15110.