

---

## CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LA APTITUD

---

### AMBIENTAL Y DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE

---

#### *Salvia hispanica* L. EN MÉXICO

---

Noé Durán Puga, José Ariel Ruiz Corral, Diego Raymundo González Eguiarte, Salvador Mena Munguía y Guillermo Orozco de Rosas

#### RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue evaluar el impacto del cambio climático sobre la aptitud ambiental (AA) y la distribución geográfica de *Salvia hispanica* L. en México. Para ello se modeló el nicho de la especie con el modelo MAXENT para las climatologías ~1950-2000, 2041-2060 y 2061-2080, haciendo uso de 23 variables ambientales. Para las climatologías futuras se consideraron dos modelos de circulación general (MCG): HadGEM2-AO y MIROC5, bajo cuatro trayectorias representativas de concentración de gases efecto invernadero: rcp2.6, rcp4.5, rcp6.0 y rcp8.5. Los resultados de la modelación MAXENT mostraron que la precipitación acumulada de mayo a octubre, la altitud y el fotoperiodo de noviembre a abril son las variables que en conjunto contri-

buyen en 85,8% a explicar la distribución geográfica de la especie. El cambio climático no produciría variaciones más allá de  $\pm 10\%$  en la precipitación de mayo-octubre de las áreas con poblaciones de chia; sin embargo si variará la temperatura media anual entre 1 y 3°C. Los descriptores ecológicos de *S. hispanica* señalaron que esta especie posee amplios rangos de adaptación pluviales, térmicos y altitudinales. Los resultados de la modelación permitieron inferir que el cambio climático para los periodos 2041-2060 y 2061-2080 provocaría que se incremente la superficie con aptitud ambiental alta y media para *S. hispanica*, por lo que es probable que el cambio climático tenga un efecto positivo sobre la distribución y dispersión de esta especie.

---

#### Introducción

México es considerado como una de las áreas con mayor diversidad del género

*Salvia*, con ~300 especies, de las cuales 88% son endémicas, lo que hace notar que es el centro de origen de esta planta (Cahill, 2004). *S. hispanica* es

la especie más abundante y está ampliamente distribuida en México; su diversidad genética y su valor alimenticio, la convierten en un recurso

vegetal promisorio que obliga a favorecer la conservación y aprovechamiento de su germoplasma (Hernández *et al.*, 2008). Se le encuentra en

---

#### PALABRAS CLAVE / Chia / Distribución Geográfica / Máxima Entropía / Modelación MAXENT / Modelos de Circulación General / *Salvia hispanica* / Variación Climática /

Recibido: 28/01/2015. Modificado: 20/04/2016. Aceptado: 25/04/2016.

**Noé Durán Puga.** Doctor en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas, Universidad de Guadalajara (UdeG), México. e-mail: noeduranpuga@yahoo.com.mx.

**José Ariel Ruiz Corral.** Doctor en Ciencias Agrícolas, UdeG,

México. Investigador, Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México. Dirección: Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, INIFAP. Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno, km 8. Tepatitlán, Jalisco, México.

C.P. 47600. e-mail: arielcajeme@hotmail.com

**Diego Raymundo González Eguiarte.** Doctor en Edafología, Colegio de Postgraduados, México. Profesor-Investigador, UdeG, México. e-mail: diegonz@cucba.udg.mx

**Salvador Mena Munguía.** Doctor en Ciencias Agrícolas, UdeG, México. Profesor-investigador, UdeG, México. E-mail: sme-na@cucba.udg.mx

**Guillermo Orozco de Rosas.** Ingeniero Agrónomo Fitotecnista, UdeG, México. e-mail: chiblanca@yahoo.com.mx

## CLIMATE CHANGE AND ITS IMPACT ON ENVIRONMENTAL APTITUDE AND GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF *Salvia hispanica* L. IN MEXICO

Noé Durán Puga, José Ariel Ruiz Corral, Diego Raymundo González Eguiarte, Salvador Mena Munguía and Guillermo Orozco de Rosas

### SUMMARY

In order to assess the impact of climate change on environmental aptitude (AA) and geographical distribution of *Salvia hispanica* L. in Mexico, the species niche distribution was modelled with the MAXENT model for climatologies ~1950-2000, 2041-2060 and 2061-2080 including data of 23 environmental variables. For future climatologies two global circulation models (GCM) were considered: HadGEM2-AO y MIROC5, under four representative greenhouse gas concentration pathways: rcp2.6, rcp4.5, rcp6.0 and rcp8.5. Results from MAXENT modelling showed that the May-October accumulated precipitation, altitude and November-April photoperiod are the most contributing variables 85.8% at explain-

ing geographical distribution of *S. hispanica*. Future climate change will not cause a May-October accumulated precipitation variation larger than  $\pm 10\%$  in areas with chía populations; however, mean annual temperature will increase between 1 and 3°C. The ecological descriptors of *S. hispanica* showed ample precipitation, temperature and altitude adaptation ranges. According to niche modelling it can be inferred that climate change in the studied periods will provoke an increment in surface with high and mid environmental aptitude for *S. hispanica*. Thus, it is probable that climate change will have a positive effect on future distribution and dispersion of this species.

## MUDANÇA CLIMÁTICA E SEU IMPACTO SOBRE A APTIDÃO AMBIENTAL E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE *Salvia hispanica* L. NO MÉXICO

Noé Durán Puga, José Ariel Ruiz Corral, Diego Raymundo González Eguiarte, Salvador Mena Munguía e Guillermo Orozco de Rosas

### RESUMO

O objetivo do presente estudo foi avaliar o impacto da mudança climática sobre a aptidão ambiental (AA) e a distribuição geográfica de *Salvia hispanica* L. no México. Para isto se modelou o nicho da espécie com o modelo MAXENT para as climatologias ~1950-2000, 2041-2060 e 2061-2080, fazendo uso de 23 variáveis ambientais. Para as climatologias futuras se consideraram dois modelos de circulação geral (MCG): HadGEM2-AO e MIROC5, sob quatro trajetórias representativas de concentração de gases efeito estufa: rcp2.6, rcp4.5, rcp6.0 e rcp8.5. Os resultados da modelagem MAXENT mostraram que a precipitação acumulada de maio a outubro, a altitude e o fotoperíodo de novembro a abril são as variáveis que em conjunto contri-

buem em 85,8% a explicar a distribuição geográfica da espécie. A mudança climática não produziria variações além de  $\pm 10\%$  na precipitação de maio-outubro nas áreas com populações de chía; no entanto haverá sim, variação na temperatura média anual entre 1 e 3°C. Os descritores ecológicos de *S. hispanica* destacaram que esta espécie possui ampla gama de adaptação pluvial, térmica e de altitude. Os resultados da modelagem permitiram inferir que a mudança climática para os períodos 2041-2060 e 2061-2080 provocaria que se incremente a superfície com aptidão ambiental alta e média para *S. hispanica*, pelo que é provável que a mudança climática tenha um efeito positivo sobre a distribuição e dispersão desta espécie.

áreas de bosque de encino o de pino-encino y se distribuye en ambientes cálidos y templados; desde el Eje Neovolcánico Transversal de las Sierras Madre Occidental y del sur de Chiapas, en altitudes que oscilan entre 1400 y 2200m. Sin embargo, de acuerdo con Capitani (2013) históricamente esta especie se ha cultivado en áreas libres de heladas y en regiones con heladas anuales, desde el nivel del mar hasta los 2500msnm.

La semilla de chía se caracteriza por poseer compuestos nutricionales, especialmente ácido linoleico y alfa linoléico, fuente natural de ácidos grasos omega-6 y omega-3, fundamentales en la nutrición

humana. Adicionalmente presenta elementos con actividad antioxidante, principalmente de flavonoides (Di Sapio *et al.*, 2012). También puede aprovecharse en forma integral, por su calidad, considerando el alto contenido de fibra dietética y alto contenido de proteínas (Mohd *et al.*, 2012), así como sus componentes de mucílago (Ramírez *et al.*, 2012). En la época prehispánica la chía fue una planta con un importante valor; las semillas, harina y aceite fueron muy apreciados para usos medicinales, culinarios, artísticos y religiosos. En Mesoamérica pre-colombina la semilla tenía un aporte valioso a la nutrición y a la subsistencia; en muchos lugares la chía

eclipsaba al maíz como recurso primario de la dieta (Cahill y Ehdiae, 2005). Actualmente la chía se siembra a nivel mundial en Argentina, México, Guatemala, Ecuador, Bolivia y Australia (Capitani, 2013). En México se siembra en los estados de Colima, Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla y Guerrero, la superficie sembrada en México se ha incrementado en los últimos años. De acuerdo con información del SIAP (2015), en el año 2010 se sembraron 2329ha y para el 2013 se registraron 18155ha, con un total de producción para este último de 8,432 toneladas. El incremento en la demanda del mercado internacional, plantea la necesidad de

augmentar la superficie de cultivo. Para ello es necesario localizar las potenciales áreas de cultivo más adecuadas actuales y futuras para su producción (Ramírez *et al.*, 2012), considerando que actualmente el sistema suelo-planta-atmósfera experimenta la influencia del fenómeno de cambio climático (IPCC, 2013), el cual a través de incrementos en la temperatura global (Trenberth *et al.*, 2007), propicia la desecación de muchas regiones a través del aumento de la evaporación (Woodhouse *et al.*, 2010) y de la modificación de los patrones de lluvia (Durán *et al.*, 2014). Estos cambios en los patrones climáticos, tendrán profundos efectos en el crecimiento y

productividad de las plantas terrestres en el futuro próximo (Attipalli *et al.*, 2010). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar el impacto del cambio climático sobre las áreas con aptitud ambiental de *Salvia hispanica* L., en los periodos 2041-2060 y 2061-2080 en México.

## Materiales y Métodos

### Bases de datos de planta

Se consideraron datos georeferenciados de 54 poblaciones de chíca, los cuales se obtuvieron de: sitio [www.tropicos.org/](http://www.tropicos.org/), de la base de datos del Banco de Germoplasma 'Salvador Miranda Colín', Universidad Autónoma Chapingo (Hernández *et al.*, 2008) y de ejemplares depositados en los herbarios del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional IPN-Michoacán (CIMI), Herbario de la Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (EBUM), Herbario de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN (ENCB), The Field Museum (F), Herbario del Centro Regional del Bajío (IEB), Herbario Nacional Forestal Biól. Luciano Vela Gálvez (INIF), Herbario Nacional de México (MEXU) y Missouri Botanical Garden (MO) (Cornejo e Ibarra, 2011).

### Áreas potenciales de distribución

En este estudio se utilizó el enfoque de máxima entropía (MAXENT) versión 3.3.3k (Phillips *et al.*, 2009), para modelar el nicho ecológico y predecir la distribución geográfica más probable de *S. hispanica*. MaxEnt se ha utilizado ampliamente para estimar las distribuciones potenciales de especies de plantas y animales con una gran precisión (Sobek *et al.*, 2012), y predecir o inferir la distribución de especies con base en las condiciones ambientales más significativas, usando solamente datos de presencia de la especie (Moreno

*et al.*, 2011). El resultado del modelo expresa el valor más adecuado del hábitat potencial en función de las variables ambientales utilizadas. Un valor alto de la función de distribución en cada pixel indica que éste presenta condiciones favorables de distribución de la especie (Morales, 2012).

### Bases de datos ambientales y sistema de información geográfica

Se utilizaron los datos mensuales, estacionales y anuales de precipitación, temperaturas máxima, mínima y media, y oscilación térmica de los periodos 2041-2060, 2061-2080 y ~1950-2000 (climatología de referencia). Estos datos climáticos fueron obtenidos del portal Global Climate Data de WorldClim y se trabajaron mediante imágenes *raster*, a una resolución de 2,5min de arco. Para las climatologías 2041-2060 y 2061-2080 se consideraron los GCM: HadGEM2-AO y MIROC5, bajo las vías representativas de concentración (RCPs) de gases efecto invernadero (GEI): rcp2.6, rcp4.5, rcp6.0 y rcp8.5. Estos escenarios de emisiones son descripciones futuras que afectan el balance de la radiación de la Tierra, provocado por sustancias vertidas a la atmósfera, tales como GEI y aerosoles, junto con otras condiciones relacionadas con el uso del suelo y la cubierta de la Tierra (Moss *et al.*, 2010).

El rcp2.6 asume que las emisiones globales anuales de GEI generarán un forzamiento radiativo de  $\sim 3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  y éstas llegarán a valores máximos entre los años 2010 y 2020, y a partir de entonces las emisiones tenderán a disminuir sustancialmente; para el rcp4.5 el forzamiento radiativo será de  $\sim 4,5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  y las emisiones llegarán a valores máximos alrededor del año 2040 para después disminuir; el rcp6.0 asume un forzamiento radiativo de  $\sim 6\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , estas emisiones llegarán a valores máximos el año 2080 y a partir de entonces habrá una reducción y,

para el rcp8.5 el forzamiento radiativo considerado es de  $\sim 8,5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  con emisiones que seguirán aumentando durante el próximo siglo (Moss *et al.*, 2008). Los GCM utilizados forman parte en la modelación del clima desarrollada por el proyecto de inter-comparación de modelos acoplados Fase 5 (CMIP5) (Walton *et al.*, 2013). La capa de altitud se obtuvo del Sistema de Información Ambiental (SIAN) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Díaz *et al.*, 2012).

El fotoperíodo se calculó mediante la expresión

$$N = 2h/15$$

donde N: fotoperíodo (h), h: ángulo horario de la salida o puesta del sol, expresado como

$$h = \text{ArcCos}(-\tan \phi \tan \delta)$$

donde  $\phi$ : latitud en grados,  $\delta$ : declinación solar en grados, según

$$\delta = 23,45 \text{sen}[360((284 + Dj)/365)]$$

donde Dj: día juliano. Para este estudio se tomó el día juliano correspondiente al día 15 de cada mes.

A partir de las variables climáticas básicas mencionadas se derivó una serie de variables adicionales para realizar el análisis MAXENT de distribución espacial de nicho potencial tanto bajo condiciones de la climatología de referencia como para las climatologías 2041-2060 y 2061-2080. El total de variables utilizadas es el siguiente: altitud (m), temperatura máxima media anual (°C), temperatura máxima mayo-octubre (°C), temperatura máxima noviembre-abril (°C), temperatura máxima del mes más cálido (°C), temperatura media anual (°C), temperatura media mayo-octubre (°C), temperatura media noviembre-abril (°C), temperatura media del mes más cálido (°C), temperatura media del mes más frío (°C), temperatura mínima media anual (°C), temperatura mínima mayo-octubre (°C), temperatura mínima noviembre-abril (°C), temperatura mínima del mes

más frío (°C), precipitación acumulada anual (mm), precipitación acumulada mayo-octubre (mm), precipitación acumulada noviembre-abril (mm), precipitación del mes más seco (mm), precipitación del mes más húmedo (mm), oscilación térmica anual (°C), oscilación térmica mayo-octubre (°C), fotoperíodo promedio mayo-octubre (h), fotoperíodo promedio noviembre-abril (h). La implementación de estos parámetros y la generación de sus imágenes raster respectivas se hizo con el sistema Idrisi Selva (Eastman, 2012). Las variables utilizadas para el análisis de este estudio son las que normalmente se han utilizado para estudiar la potencialidad territorial de especies vegetales (Moreno *et al.*, 2011).

Con el uso de las coberturas de los parámetros y los datos de presencia de la especie, se modeló la distribución geográfica del nicho de *S. hispanica* para los escenarios climáticos, se usaron el 75% de los registros de presencia como puntos de entrenamiento y el 25% como puntos de validación. Se utilizó la curva operacional o curva ROC y el índice AUC (área bajo la curva), para evaluar el modelo estadístico, ya que éste índice es de los más utilizados para medir la calidad de los modelos (Moreno *et al.*, 2011).

### Áreas con probabilidad de condición favorable

Se utilizó el modelo de predicción MAXENT implementado en el sistema Idrisi Selva (Eastman, 2012), con el que se generó un mapa de probabilidad de presencia con valores de pixel de 0,001 a 1,0. Estos valores se clasificaron en tres intervalos que van del 0,001 a 0,33; de 0,33 a 0,66 y de 0,66 a 1,0 y representan las áreas con probabilidad de presencia de condiciones favorables para el desarrollo de la especie; se les denominó como áreas con AA baja, media y alta, respectivamente. Pixeles con un valor  $< 0,001$  se consideraron como áreas con nula aptitud ambiental (Morueta *et al.*, 2010).

## Resultados y Discusión

En la Figura 1 se muestra la distribución geográfica actual de *S. hispánica* representada por las accesiones utilizadas en este estudio. En dicha figura también se muestra la distribución potencial actual de esta especie producto de la modelación de distribución de nicho para la climatología de referencia (~1950-2000). Como puede notarse, actualmente *S. hispánica* se encuentra distribuida fundamentalmente en la región centro-sur del país, con alguna dispersión hacia las regiones sureste y noroeste. Esto es concordante con lo señalado por Cornejo e Ibarra (2011) quienes establecen que la mayor diversidad de especies del género *Salvia* se ubica en las áreas del centro-sur de México. Los bosques templados, en particular los de las coníferas y encinares, son los tipos de vegetación que albergan la mayor proporción de especies de *Salvia* (Jamboonsri *et al.*, 2012). Lo anterior puede representar una desventaja para *S. hispánica*, ya que en bosques de coníferas se produce mayor deforestación y cambio de uso del suelo, con el consecuente efecto de alteración del clima (Ricker *et al.*, 2007). Esto podría constituir una seria amenaza para la permanencia y dispersión de las poblaciones nativas de *S. hispánica*, ya que provocan entre otros efectos, cambios en la composición y riqueza de especies en los ecosistemas (Tasser y Tappeiner, 2002).

Como puede verse en la Figura 1, la mayor parte de las áreas que resultaron con una aptitud ambiental alta y media, se encuentran también en la región centro-sur, con una cierta dispersión en dirección oeste, lo cual señala que difícilmente las condiciones ambientales que favorecen la distribución de *S. hispánica* se pueden encontrar en otras regiones del país (Medina *et al.*, 1998).

Con relación al análisis de los nichos potenciales de distribución, el valor del área bajo la curva (AUC) para la curva ROC y datos de entrenamiento fue de 0,978 y para

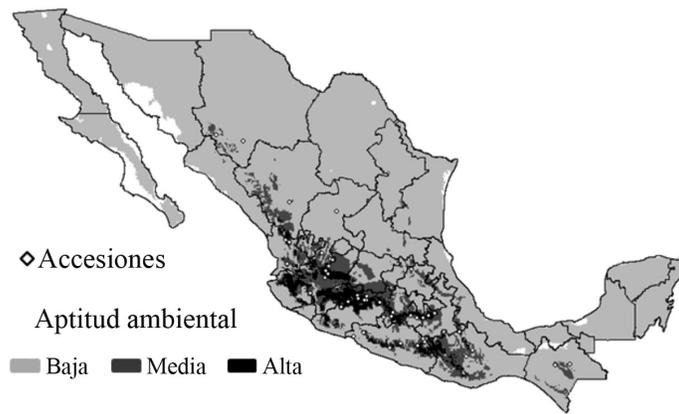


Figura 1. Distribución actual y potencial de *S. hispánica*, bajo la climatología de referencia (1950-2000).

los datos de validación fue de 0,967, lo que de acuerdo con Parolo *et al.* (2008), indica un buen ajuste y confiabilidad del modelo para clasificar la presencia de *S. hispánica*. El AUC de las curvas ROC mientras más se aproxima a un valor de 1 indica una mayor precisión del modelo (Fawcett, 2006); una guía aproximada para clasificar la precisión con base en el resultado del AUC es la siguiente: 0,9-1 excelente; 0,8-0,9 buena; 0,7-0,8 regular; 0,6-0,7 pobre; 0,5-0,6 imprecisa. Producto del análisis MAXENT y de la tabla de ponderación de variables que se genera, se obtuvo que las variables ambientales que mayormente explican la distribución geográfica de *S. hispánica* son (Tabla 1): la precipitación acumulada promedio mayo-octubre, la altitud y el fotoperiodo promedio noviembre-abril; las tres en conjunto explican 85,8% de la

variación de la distribución geográfica de *S. hispánica*. De éstas, la única variable que puede ser modificada por el cambio climático es la precipitación mayo-octubre, por lo que los patrones futuros de distribución de *S. hispánica* dependerán de los patrones regionales de lluvia que imponga el cambio climático durante el presente siglo. No obstante, cabe señalar que la altitud al constituir una de las tres variables más determinantes de la distribución de *S. hispánica*, de alguna manera está indicando que la distribución de esta especie está también en función de la temperatura, dada la estrecha relación que guardan estas dos variables.

En las Figuras 2 y 3 se puede apreciar la dinámica de cambio que tendría la precipitación mayo-octubre y la temperatura media anual durante los periodos 2041-2060 y 2061-2080. Como puede apreciarse

en la Figura 2, la mayoría de los sitios actuales de accesión de *S. hispánica* experimentarían una variación pluvial de -10 a 10% en mayo-octubre durante estos dos periodos futuros. Sin embargo, en las rutas de emisiones rcp4.5 y rcp8.5 de ambas climatologías, se puede notar que un cambio más significativo de precipitación (+10 a +40%) alcanzaría a diversas poblaciones actuales de chía. En la Figura 3 se aprecia que los niveles de calentamiento esperados para las climatologías estudiadas van de 1 a 3°C, alcanzándose a distinguir dos regiones, la correspondiente a un incremento de 1 a 2°C y otra relacionada con un incremento térmico de 2 a 3°C. Como puede verse (Figura 3), en la climatología 2041-2060 las rcp2.6 y 6.0 tienen como predominante un nivel de calentamiento de 1 a 2°C, mientras que en las rcp4.5 y 8.5 predomina superficialmente un incremento térmico de 2 a 3°C. Lo anterior tanto con el modelo HadGEM2-AO como con el modelo MIROC5. Con relación a la climatología 2061-2080, existe también coincidencia entre ambos modelos, con excepción de la rcp4.5, en la que para el modelo HadGEM2-AO predomina en el país un calentamiento de 1 a 2°C, mientras que con el modelo MIROC5 la mayoría de las regiones acusan un calentamiento de 2 a 3°C. En términos generales, las poblaciones de chía se verían afectadas por una mayor tasa de calentamiento (2-3°C) con las rcp4.5 y

TABLA I  
DESCRIPTORES ECOLÓGICOS Y CONTRIBUCIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES QUE APORTAN A EXPLICAR LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE *S. hispánica*

| Variable                                  | Valor mínimo | Valor máximo | Contribución (%) |
|---|--------------|--------------|------------------|
| Precipitación acumulada mayo-octubre (°C) | 297          | 1524         | 36,5             |
| Altitud (m)                               | 774          | 2521         | 30,6             |
| Fotoperiodo promedio noviembre-abril (h)  | 11           | 11.57        | 18,7             |
| Precipitación del mes más seco (mm)       | 2            | 47           | 4,1              |
| Temperatura mínima media anual (°C)       | 5            | 21           | 3,6              |
| Temperatura media del mes más cálido (°C) | 14           | 29           | 2,5              |
| Temperatura mínima noviembre-abril (°C)   | 8            | 18           | 1,1              |
| Precipitación del mes más húmedo (mm)     | 67           | 371          | 1                |
| Temperatura media mayo-octubre (°C)       | 13,4         | 28,4         | 0,9              |
| Oscilación térmica noviembre-abril (°C)   | 11,7         | 19,7         | 0,5              |
| Fotoperiodo mayo-octubre (h)              | 12,4         | 12,9         | 0,2              |
| Oscilación térmica anual (°C)             | 10,4         | 18           | 0,1              |
| Temperatura media del mes más frío (°C)   | 6,4          | 26           | 0,1              |

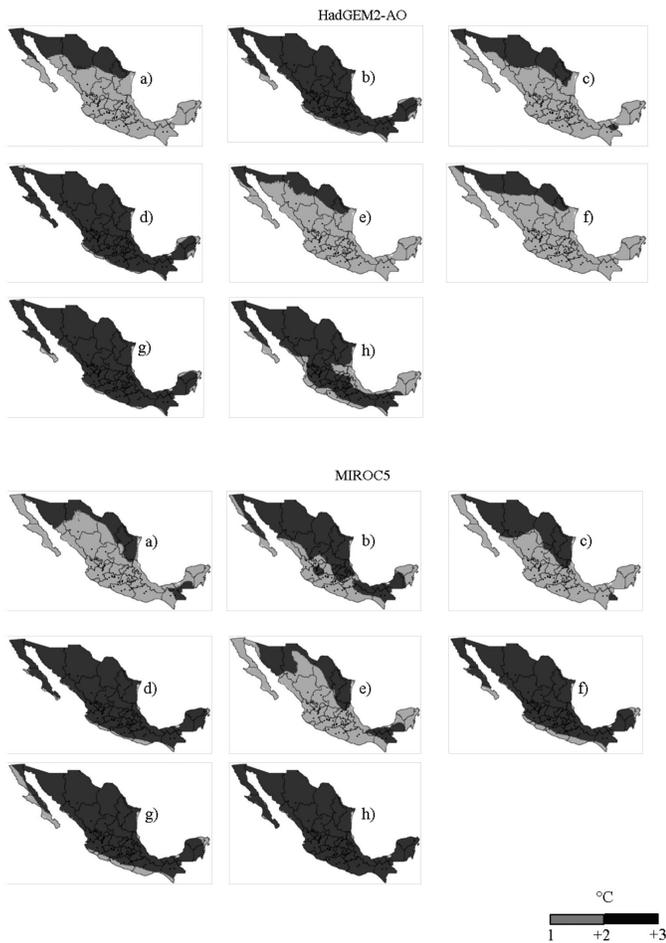


Figura 2. Porcentaje de cambio de la precipitación mayo-octubre predicho por dos MCG para dos climatologías futuras y cuatro RCPs: a) 2041-2060 rcp2.6; b) 2041-2060 rcp4.5; c) 2041-2060 rcp6.0; d) 2041-2060 rcp8.5; e) 2061-2080 rcp2.6; f) 2061-2080 rcp4.5; g) 2061-2080 rcp6.0; h) 2061-2080 rcp8.5.

8.5 en la climatología 2041-2060 y con las rcp6.0 y 8.5 en la climatología 2061-2080 (Figura 3). El cómo afectarían estos cambios climáticos sobre la distribución de *S. hispanica* depende de los rangos climáticos de adaptación de esta especie. En la Tabla I, se pueden observar los descriptores ecológicos de *S. hispanica* en función de las variables ambientales de los sitios de acesión. Como puede notarse, los rangos ambientales de distribución de esta especie son amplios, tanto para variables relacionadas con la temperatura como para las de precipitación. Esto señala una amplia rusticidad de esta planta, característica que podría ser favorable en ambientes donde el cambio climático se manifieste de manera más agresiva (FAO, 2007). De

acuerdo con las accesiones analizadas, el intervalo de precipitación estacional (mayo-octubre) varía entre 297 y 1524mm, valores que concuerdan parcialmente con lo señalado por Capitani (2013) quien menciona información de sitios con presencia de chíá entre los 390 y 1141mm anuales de lluvia.

Asimismo los límites altitudinales (Tabla I), reportan que el intervalo de distribución actual de *S. hispanica* varía de los 774 a 2521m, valor máximo acorde con lo reportado por Capitani (2013), quien señaló que históricamente esta especie ha sido cultivada en ambientes tropicales tanto como en ambientes subtropicales, desde el nivel del mar hasta los 2500m. Ahora bien, dicho intervalo altitudinal de

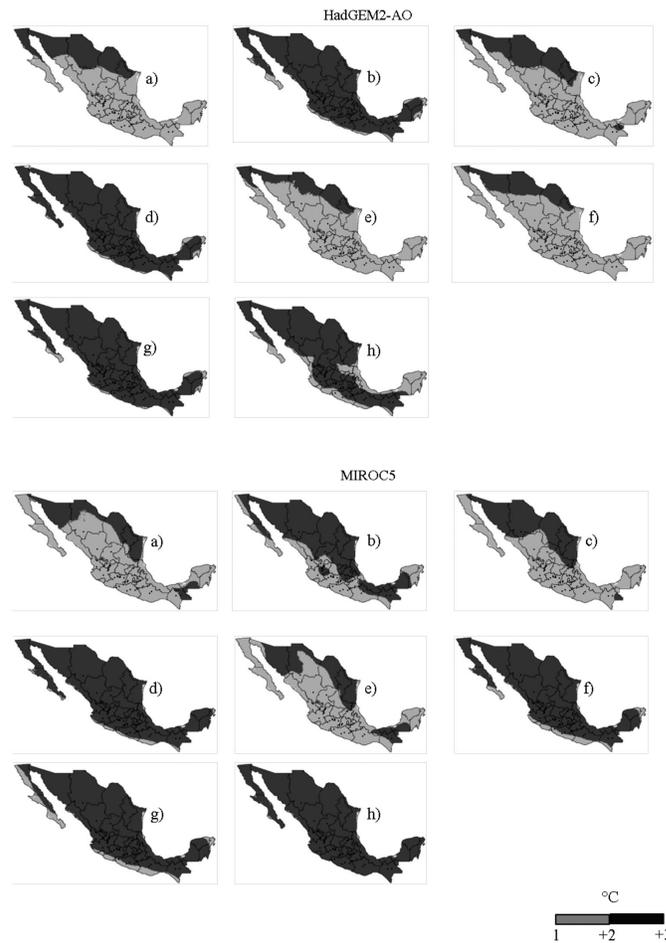


Figura 3. Tasa de cambio de la temperatura media anual predicha por dos MCG para dos climatologías futuras y cuatro RCPs: a) 2041-2060 rcp2.6; b) 2041-2060 rcp4.5; c) 2041-2060 rcp6.0; d) 2041-2060 rcp8.5; e) 2061-2080 rcp2.6; f) 2061-2080 rcp4.5; g) 2061-2080 rcp6.0; h) 2061-2080 rcp8.5.

la especie podría ampliarse debido a la presión que ejercería el incremento de temperatura en 2041-2060 y 2061-2080, obligando a *S. hispanica* a migrar a mayores altitudes.

#### Aptitud ambiental para *S. hispanica* en escenarios de cambio climático

La delimitación de áreas con para *S. hispanica* y su dinámica territorial en función de los cambios pluviales y térmicos, determinan en qué sentido impactan los cambios climáticos discutidos anteriormente sobre la expansión, constricción o mantenimiento de las áreas de distribución de esta planta.

En la Figura 4 se puede apreciar la dinámica que tendrían las áreas con AA alta, media y baja para *S. hispanica*

en función del cambio climático para los periodos 2041-2060 y 2061-2080. Al respecto, el modelo HadGEM2-AO para las cuatro trayectorias representativas de concentración de gases efecto invernadero, predice para ambos periodos climáticos una dispersión favorable de la especie, ya que la superficie con AA alta y media se incrementará con relación al panorama de la climatología de referencia (1950-2000, Figura 1). De manera complementaria, la superficie con AA baja se reducirá. Con el modelo MIROC5 se obtuvieron estimaciones más heterogéneas entre climatologías y entre Rcps. El dato más consistente es que la superficie con AA media se incrementará tanto en 2041-2060 como en 2061-2080, independientemente de la rcpde que

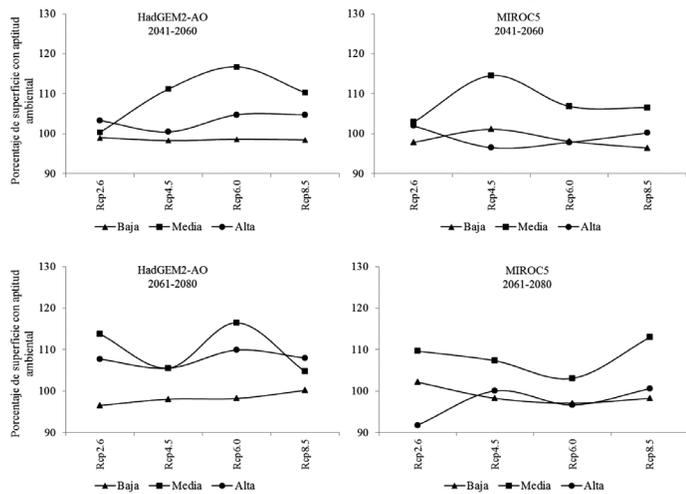


Figura 4. Porcentaje de superficie con aptitud ambiental (baja, media y alta) durante los periodos 2041-2060 y 2061-2080 con los MCG HadGEM2-AO y MIROC5, bajo las cuatro trayectorias representativas de concentración de GEI (rcp) para *S. hispanica*.

se trate. Esto puede indicar un aspecto positivo para la dispersión de *S. hispanica*, sin embargo, la superficie con AA alta sólo se mantendrá o se incrementará ligeramente en las rcp2.6 y 8.5 de la climatología 2041-2060 y en las rcp4.5 y 8.5 de la climatología 2061-2080. En términos generales la rcp6.0 produce los valores más altos de superficie con AA cuando se utiliza el modelo HadGEM2-AO, señalando que este escenario atmosférico-climático resultaría benéfico para una posible ampliación de la distribución geográfica de *S. hispanica* en los periodos 2041-2060 y 2061-2080. En el caso del modelo MIROC5, para la climatología 2041-2060, la rcp4.5 fomenta el mayor porcentaje de superficie con AA media y baja y la rcp2.6 mantiene el mayor porcentaje de superficie con AA alta; en tanto para la climatología 2061-2080, la ruta de concentración de GEI 8.5 tiende a producir los mayores porcentajes de aptitud ambiental.

En la Figura 5 se muestra la distribución espacial potencial del nicho para *S. hispanica* en las climatologías 2041-2060 y 2061-2080. A simple vista se mantiene una distribución espacial muy similar comparada con la climatología base 1950-2000. Sin embargo, como ya se discutió con antelación, el

cambio climático de estos periodos (2041-2060 y 2061-2080) si tiene efecto sobre la dinámica de la superficie con aptitud ambiental y por ende sobre las áreas potenciales de distribución de chíá, siendo este efecto en general positivo, esto es de incremento de superficie potencial. Sólo en los casos MIROC5 rcp4.5 en climatología 2041-2060 y MIROC5 rcp2.6 climatología 2061-2080, las áreas potenciales de distribución se reducen, desapareciendo la vertiente que va hacia el noroeste del país, seguramente debido a los cambios climáticos de estos escenarios (Figura 5).

### Conclusiones

Las variables ambientales que mayormente contribuyen a explicar la presencia y la distribución geográfica potencial de *S. hispanica* L. en México; son la precipitación acumulada mayo-octubre (mm), la altitud (m) y el fotoperiodo promedio noviembre-abril (h).

Los cambios climáticos esperados para los periodos 2041-2060 y 2061-2080 establecen que la mayoría de las poblaciones actuales de chíá en el país, experimentarán una variación de la precipitación mayo-octubre entre -10 y +10%; sin embargo algunas poblaciones tendrán un incre-

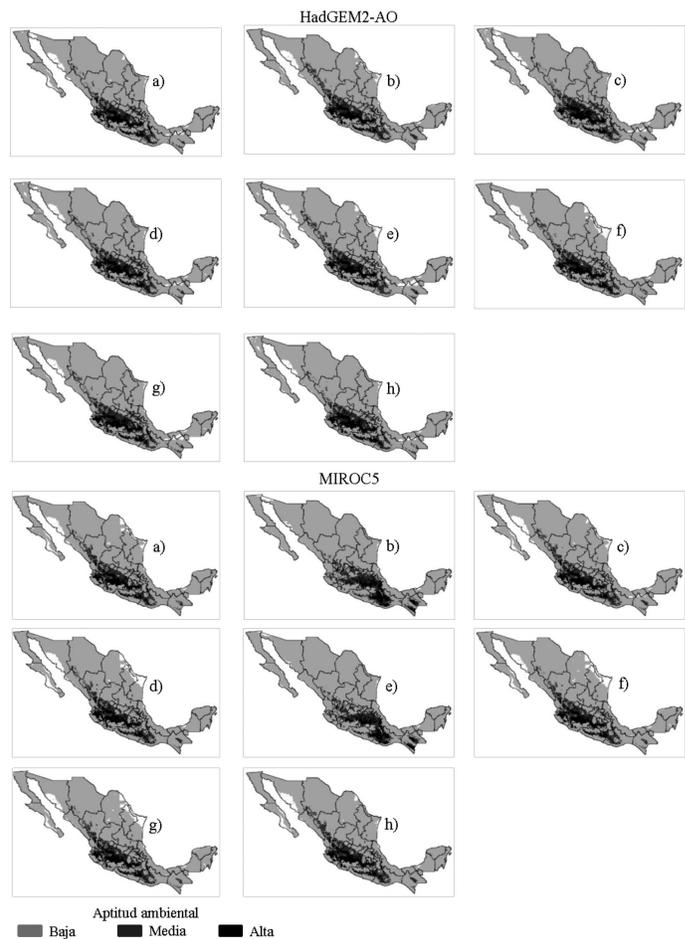


Figura 5. Nichos potenciales de distribución para *S. hispanica* para dos climatologías y cuatro RCPs de acuerdo con los modelos HadGEM2-AO y MIROC5: a) 2041-2060 rcp2.6; b) 2041-2060 rcp4.5; c) 2041-2060 rcp6.0; d) 2041-2060 rcp8.5; e) 2061-2080 rcp2.6; f) 2061-2080 rcp4.5; g) 2061-2080 rcp6.0; h) 2061-2080 rcp8.5.

mento de la precipitación acumulada mayo-octubre en el intervalo de 10 a 40%. El incremento térmico esperado para 2041-2060 y 2061-2080 es de 1 a 3°C. Esta variación de tasa de calentamiento está relacionada con la ruta de concentración de gases efecto invernadero.

*S. hispanica* es una especie que se adapta a un amplio rango de condiciones de altitud, precipitación y temperatura, lo que le provee ventajas adaptativas a ambientes con variación climática. Esto, al conjugarse con los cambios climáticos previstos para las climatologías 2041-2060 y 2061-2080 da como resultado un incremento de la superficie con aptitud ambiental media y alta, por lo que ésta es una especie que se afectará favo-

rablemente por los cambios climáticos esperados durante el presente siglo.

### REFERENCIAS

- Attipalli RR, Girish KR, Agepati SR (2010) The impact of global elevated CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and plant productivity. *Curr. Sci.* 99: 46-57.
- Cahill JP (2004) Genetic diversity among varieties of chia (*Salvia hispanica* L.) *Genet. Resour. Crop Evol.* 51: 773-781.
- Cahill JP, Ehdai B (2005) Variation and heritability of seed mass in chia (*Salvia hispanica* L.) *Genet. Resour. Crop Evol.* 52: 201-207.
- Capitani MI (2013) *Caracterización y Funcionalidad de Subproductos de Chíá (Salvia hispanica L.): Aplicación en Tecnología de Alimentos*. Tesis. Universidad Nacional de la Plata. Argentina. 204 pp.

- Cornejo-Tenorio G, Ibarra-Manríquez G (2011) Diversidad y distribución del género *Salvia* (Lamiaceae) en Michoacán, México. *Rev. Mex. Biodivers.* 82: 1279-1296.
- Díaz PG, Guajardo PRA, Medina GG, Sánchez CI, Soria RJ, Vázquez AMP, Quijano CJA, Legorreta PF, Ariel RCJ (2012) *Potencial Productivo de Especies Agrícolas de Importancia Socioeconómica en México*. 1ª ed. INIFAP. Xalapa, México. 140 pp.
- Di Sapio O, Bueno M, Busilacchi H, Quiróga M, Severin C (2012) Caracterización morfoanatómica de hoja, tallo, fruto y semilla de *Salvia hispanica* L. (Lamiaceae). *Bol. Latinoam. Caribe Plant. Med. Aromat.* 11: 249-268.
- Durán PN, Ruiz CJA, González EDR, Ramírez OG (2014) Impact of climate change on grasses cultivation potential of three altitudinal strata-agricultural lands of México. *AJAR* 9(18): 1396-1406.
- Eastman JR (2012) *Idrisi Selva Manual, Version 17*. Clark Labs, Clark University. Worcester, MA, EEUU. 322 pp.
- Fawcett T (2006) An introduction to ROC analysis. *Pattern Recogn. Lett.* 27: 861-874.
- FAO (2007) *Adaptation to Climate Change in Agriculture, Forestry and Fisheries: Perspective, Framework and Priorities*. FAO Interdepartmental working group on climate change. Roma, Italia. 24 pp.
- Hernández GJA, Miranda CS, Peña LA (2008) Cruzamiento natural de chía (*Salvia hispanica* L.). *Rev. Chapingo Ser. Hort.* 14: 331-337.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*. Working group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers (Stocker TF, Dahe Q, Gian-Kasper P, Melinda MB, Tignor, Simon KA, Judith B, Alexander N, Yu X, Bex V, Midgley MP, Eds.). Switzerland. 27 pp.
- Jamboonsri W, Phillips TD, Geneve RL, Cahill JP, Hildebrand DF (2012) Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L. -a new  $\omega$ 3 source-. *Genet. Resour. Crop Evol.* 59: 171-178.
- Medina GG, Ruiz CJA, Martínez PRA (1998) *Los Climas de México: Una Estratificación Ambiental Basada en el Componente Climático*. Libro Técnico N° 1. SAGAR-INIFAP. México. pp. 104.
- Mohd MA, Keong YS, Yong HW, Kee BB, Wei TS, Guan TS (2012) The promising future of chía, *Salvia hispanica* L. *J. Biomed. Biotechnol.* 2012: 1-9.
- Morales SN (2012) Modelos de distribución de especies: Software MAXENT y sus aplicaciones en conservación. *Conserv. Amb.* 2: 1-5.
- Moreno R, Zamora R, Molina JR, Vásquez A, Herrera M (2011) Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forest using Maximum entropy (MAXENT). *Ecol. Inf.* 6: 364-370.
- Morueta HN, Fløjgaard C, Svenning JC (2010) Climate change risks and conservation implications for a threatened small-range mammal species. *PLoS ONE* 5(4): e10360.
- Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T, Edmonds J, Elgizouli I, Emori S, Erda L, Hibbard K, Jones R, Kainuma M, Kelleher J, Lamarque JF, Manning M, Matthews B, Meehl J, Meyer L, Mitchell J, Nakicenovic N, O'Neill B, Pichs R, Riahi K, Rose S, Runci P, Stouffer R, Detlef van Vuuren, Weyant J, Wilbanks T, Jean Pascal van Ypersele, Zurek M (2008) *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza. 132 pp.
- Moss HR, Edmonds AJ, Hibbard AK, Manning RM, Rose KS, van Vuuren PD, Carter RT, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meeh AG, Mitchel FBM, Nakicenovic N, Riahi K, Smith JS, Stouffer JR, Thomson MA, Weyant PJ, Wilbanks JT (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756.
- Parolo G, Rossi G, Ferrarini A (2008) Toward improved species niche modelling: *Arnica montana* in the Alps as a case study. *J. Appl. Ecol.* 45: 1410-1418.
- Phillips SJ, Dudík M, Elith J, Graham CH, Lehmann A, Leathwick J, Ferrier S (2009) Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecol. Appl.* 19: 181-197.
- Ramírez JG, Rosado RJG, Castellanos RAF, Chel GLA (2012) Potencial productivo para el cultivo de chía (*Salvia hispanica* L.) en México y calidad del aceite extraído. *Rev. Fac. Ing. Química* 52: 32-36.
- Ricker M, Ramírez KI, Ibarra MG, Martínez E, Ramos HC, González MG, Gómez RG, Palacio PJL, Hernández MH (2007) Optimizing conservation of forest diversity: a country-wide approach in Mexico. *Biodivers. Conserv.* 16: 1927-1957.
- SIAP (2015) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. 8 pp.
- Sobek SS, Kluza DA, Cuddington K, Lyons DB (2012) Potential distribution of emerald ash borer: What can we learn from ecological niche models using MAXENT and GARP? *Forest Ecol. Manag.* 281: 23-31.
- Tasser E, Tappeiner U (2002) Impact of land use changes on mountain vegetation. *Appl. Veget. Sci.* 5: 173-184.
- Trenberth KE, Jones PD, Ambenje P, Bojariu R, Easterling DR, Kleint-Tank A, Parker D, Rahimzadeh F, Renwick JA, Rusticucci M, Soden B, Zhai P (2007) Observations: surface and atmospheric climate change. En *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press. Nueva York, EEUU. 996 pp.
- Walton D, Meyerson J, Neelin JD (2013) *Accessing, Downloading and Viewing CMIP5 data*. Earth System Grid Federation. 25 pp.
- Woodhouse CA, Meko DM, MacDonald GM, Stahle DW, Cook ERA (2010) 1,200-year perspective of 21<sup>st</sup> century drought in southwestern North-America. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 107: 21283-21288.