

Áreas potenciales actuales y futuras de los cultivos de aguacate Hass en México utilizando el modelo *Maxent* en escenarios de cambio climático

Current and future potential areas of Hass avocado crops in Mexico using MaxEnt model under climate change scenarios

Juan F. Charre-Medellín¹, Jean F. Mas² & Laura A. Chang-Martínez³

Para citar este artículo: Charre-Medellín, J.F., Mas, J.F. & Chang-Martínez, L.A. (2019). Áreas potenciales actuales y futuras de los cultivos de aguacate Hass en México utilizando el modelo *Maxent* en escenarios de cambio climático. *UD y la Geomática*, (14), 26-33. DOI: <https://doi.org/10.14483/23448407.15659>

Fecha de recepción: 20 de junio de 2019

Fecha de aceptación: 02 de diciembre de 2019

RESUMEN

La producción y exportación del aguacate Hass en México representa el segundo producto agroalimentario más importante en la economía del país. Los objetivos fueron modelar la distribución potencial actual para el establecimiento de cultivos de aguacate Hass en México y evaluar el impacto del cambio climático bajo diferentes escenarios. Mediante puntos de presencia de cultivos de aguacate en México y variables climáticas, se utilizó *Maxent* para modelar la distribución potencial actual y futura del aguacate. Actualmente el aguacate en México está asociado a los bosques templados del Eje Volcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur. En promedio, para el año 2050 en el escenario optimista (RCP 2.6) se perdería el 20,9 % de la superficie con potencial actual para el cultivo de aguacate en México y 34,8 % en el escenario pesimista (RCP 8.5). Es importante tomar medidas en la planeación del territorio que permitan priorizar acciones de conservación y vigilancia para evitar el cambio de uso de suelo. *Maxent* es una herramienta adecuada para predecir las áreas potenciales actuales y futuras para el establecimiento de cultivos; sin embargo, es importante utilizar un conjunto de modelos de circulación global que permitan observar tendencias en los impactos del cambio climático.

Palabras clave: escenarios, Maxent, modelos de circulación global, trayectorias de concentración representativas.

ABSTRACT

The production and exportation of Hass avocado in Mexico represents the second most important agri-food product in the economy. This study aims at modeling the current potential distribution for the establishment of Hass avocado crop lands in Mexico and assessing the impact of climate change under different scenarios. Maxent was used to model the current and future potential distribution of the avocado using points of presence of avocado crop lands in Mexico and climatic variables. Currently the avocado in Mexico is associated with the temperate forests of the Transversal Volcanic Belt and the Sierra Madre del Sur. On average for the year 2050 in the optimistic scenario (RCP 2.6), 20.9% of the area with current potential for avocado cultivation in Mexico and 34.8% in the pessimistic scenario would be lost (RCP 8.5). It is important to take measures in the planning of the territory, which allow prioritizing conservation and surveillance actions to avoid land use change. Maxent is an adequate tool for predicting current and future potential areas for the establishment of crops, however, it is important to use a set of global circulation models that allow observing trends in the climate change.

Keywords: Scenarios, Maxent, Global Climate models, Representative Concentration Pathways.

- 1 Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 58190, Morelia Michoacán, México. Correo electrónico: jcharre@ciga.unam.mx
- 2 Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 58190, Morelia Michoacán, México. Correo electrónico: jfmas@ciga.unam.mx
- 3 Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 58190, Morelia Michoacán, México. Correo electrónico: changml07@gmail.com

Introducción

En los últimos treinta años la expansión del cultivo de aguacate cv. Hass en México se ha incrementado en un 400 % con más de 200.000 hectáreas y 1,89 millones de toneladas producidas anualmente, posicionando al país como el líder mundial en la producción y exportación de esta variedad. Estos números convierten al aguacate como el producto más exitoso de la exportación agroalimentaria nacional y principal proveedor del mercado internacional con un aporte de 45,95 % (USD 2227,25 millones en 2016) del valor de las exportaciones mundiales, lo que representa el 4,39 % del producto interno bruto (PIB) agrícola nacional (Sagarpa, 2017). El incremento en la producción de este cultivo en México, para satisfacer las demandas internacionales y la rentabilidad económica que esto conlleva, ha contribuido a la pérdida de bosques templados y al cambio ilegal en el uso de suelo (Barrientos-Priego 2010). La deforestación de los bosques templados en los estados donde se cultiva aguacate cv. Hass se debe principalmente a la similitud de las condiciones climáticas que necesitan los bosques de pino-encino y los cultivos de aguacate (Villanueva-Tomas y Zepeda-Anaya 2016).

Ante el incremento de las áreas de cultivos de aguacate cv. Hass observado para México en los últimos diez años, y las estimaciones en el consumo y producción que proyecta la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural para 2030, de 67,2 % (Planeación Agrícola Nacional 2017-2030), es prioritario identificar las áreas potenciales para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México actualmente y ante escenarios de cambio climático, ya que la temperatura y precipitación son los dos factores de mayor incidencia en el desarrollo del cultivo de aguacate (Sagarpa 2017, SIAP, 2017). En México se han previsto aumentos en la temperatura y disminución de la precipitación en escenarios moderados de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) para mediados del presente siglo, de 2 a 3 °C y de 50 a 10 mm, respectivamente (Álvarez-Bravo *et al.*, 2017).

Recientemente, los modelos de distribución de especies (SDM, por su sigla en inglés), que son representaciones espaciales de la correlación entre puntos de presencia y un conjunto de variables ambientales que determinan las condiciones favorables para la presencia de una especie en el espacio geográfico (Soberón, Osorio-Olvera y Peterson, 2017), se han implementado como una herramienta que permite predecir las áreas potenciales para el establecimiento de cultivos como el aguacate en Colombia y México, tomate en Brasil o cártamo en China (Elias *et al.*, 2017; Ramírez-Gil, Morales y Peterson, 2018; Vallejo-Pérez *et al.*, 2017; Wei *et al.*, 2018).

Dentro de los diversos enfoques para realizar los SDM, *Maxent* (máxima entropía) ha demostrado tener un buen desempeño y presenta diversas ventajas: a) utiliza solo datos de presencia; b) permite generar mapas de aptitud

de hábitat; c) cuantifica el valor de importancia de cada variable mediante una prueba de *jackknife*; d) permite el uso de variables con valores continuos o categóricos; e) puede re proyectar la distribución potencial en el espacio (e.g. en otras regiones) o en el tiempo (e.g. bajo escenarios de cambio climático) (Elith *et al.*, 2006; Molinos *et al.*, 2017; Qiao, Soberón y Peterson, 2015; Wei *et al.*, 2018).

En este sentido, los objetivos de este trabajo son: a) modelar la distribución potencial actual de las áreas óptimas para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México y b) evaluar el impacto del cambio climático para el año 2050, a partir de diez modelos climáticos globales (GCM, por su sigla en inglés) y bajo tres escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP, por su sigla en inglés).

Metodología

Puntos de presencia de cultivos de aguacate cv. Hass

Para determinar la distribución potencial de los cultivos de aguacate cv. Hass en México, se obtuvieron 155 coordenadas de estos cultivos, ubicadas en los estados de Michoacán, Jalisco, México, Nayarit, Guerrero y Morelos, los cuales concentran el 93 % y 96 % de la superficie sembrada y producción a nivel nacional en 2017, respectivamente (SIAP, 2017). Los puntos de presencia de cultivos fueron obtenidos y seleccionados de publicaciones científicas (n=40) (Álvarez-Bravo, Salazar-García, Ruiz-Corral y Medina-García, 2017), tesis de maestría (n=19) (Hernández-Aguilar, 2018) y utilizando la herramienta de Google Earth (<http://www.google.com/earth/>). Siguiendo la metodología propuesta por Narouei-Khandan, Halbert, Worner y Van Bruggen (2016), identificamos cultivos de aguacate en los principales municipios productores de cada uno de los seis estados (n=96) (SIAP 2017). Los puntos de presencia utilizados para generar los modelos presentan un gradiente altitudinal que va desde los 730 a 2750 m.

Variables ambientales actuales y futuras

Debido a que la temperatura y precipitación se han considerado factores de mayor incidencia en el desarrollo del cultivo de aguacate (Sagarpa, 2017), se asumieron las 19 variables bioclimáticas de WorldClim en formato ASCII con una resolución espacial de 0,0083° (~1 km²) (<http://www.worldclim.org/bioclim>) para modelar la distribución potencial de las áreas para el establecimiento de cultivo en México actualmente. Este conjunto de variables representan las tendencias anuales, estacionalidad y valores extremos de la temperatura y precipitación (Hijmans *et al.*, 2005). Estas variables ambientales han sido utilizadas ampliamente para realizar SDM, debido a que reflejan la tolerancia de las

especies a la temperatura y precipitación y pueden ser adecuadas para describir la distribución de especies en grandes extensiones (Choudhury *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2018).

Para las predicciones climáticas en el año 2050 de las áreas potenciales para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México, se utilizó el mismo conjunto de variables bioclimáticas disponibles en WorldClim (<http://www.worldclim.org/bioclim>) para los diez GCM (BCC-CSM1-1, CCSM4, GFDL-CM3, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3 y NorESM1-M) disponibles para los tres escenarios de RCP (RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5). Las RCP varían según la magnitud del forzamiento radiativo que aportan al sistema climático natural para el año 2100 en relación con el año 1750, esto es, 2,6 W m⁻² en el caso del escenario RCP2.6 (bajas emisiones de GEI); 4,5 W m⁻², en el caso del escenario RCP4.5 (emisiones intermedias de GEI), y 8,5 W m⁻², en el caso del escenario RCP8.5 que corresponde a altas emisiones de GEI (Álvarez-Bravo *et al.*, 2017; IPCC, 2013; Jodar-Abellan, Ruiz y Melgarejo, 2018). Por ello, los resultados de cada uno de los GCM varían en función del forzamiento introducido inicialmente (IPCC, 2013; Jodar-Abellan, Ruiz y Melgarejo, 2018).

Modelos de distribución potencial actuales y futuros para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México

Utilizamos el algoritmo *Maxent* 3.3.3k (<https://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>) para modelar la distribución potencial de los cultivos de aguacate cv. Hass en México. *Maxent* utiliza el principio de máxima entropía para estimar, a partir de los valores existentes en las capas climáticas donde se produjeron los registros de presencia, una distribución de probabilidad que varía de 0 a 1, que puede interpretarse como un índice de la idoneidad del hábitat para la población que se está modelando, en este caso para los cultivos de aguacate (Phillips, Anderson y Schapire, 2006; Phillips *et al.*, 2017). Debido a que *Maxent* es un método de regularización que permite evaluar la contribución de cada variable para la generación de los modelos, hay menos necesidad de eliminar variables correlacionadas (Elith *et al.* 2006, Phillips, Anderson y Schapire, 2006).

Utilizamos los valores predeterminados de *Maxent* de 500 iteraciones y el límite de convergencia de 0,00001 durante el modelado, con formato de salida logístico, crear curva de respuesta y contribución de variables mediante la prueba de Jackknife, la cual identifica las variables ambientales con la mayor contribución para generar los SDM cuando se utilizan de forma aislada (Moratelli, De Andreazzi, De Oliveira y Cordeiro, 2011). Sobre la base de distribución potencial actual, proyectamos la distribución potencial para los diez GCM en cada uno de los tres escenarios de RCP descritos anteriormente, activando la opción

“extrapolate”, la cual permite proyectar la distribución en áreas climáticamente diferentes a las presentes en la actualidad siguiendo la tendencia observada en los datos de calibración (Cobos, Peterson, Osorio-Olvera, Barve, 2019).

El 70 % de las de 155 coordenadas de cultivos de aguacate cv. Hass fue utilizado para calibrar el modelo y el 30 %, para su validación. Para evaluar el rendimiento del modelo, utilizamos el análisis ROC-Parcial mediante la plataforma Niche Toolbox (Osorio-Olvera, 2016; Peterson, Papeş y Soberón, 2008), la cual permite evaluar solo las áreas proporcionales sobre las que los modelos realmente hicieron predicciones considerando errores de omisión <10 %. Esto permite una ponderación diferencial de los errores de omisión y comisión (Peterson, Papeş y Soberón, 2008). ROC-Parcial presentan un rango de valores de 0 a 2; los valores por encima de 1 sugieren un mejor desempeño que el azar (Osorio-Olvera, 2016).

Con el fin de cuantificar la superficie de la distribución potencial actual para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México y para cada uno de los modelos GCM en los escenarios RCP, generamos mapas binarios (presencia/ausencia) mediante el umbral diez percentil de los puntos de presencia utilizados para generar el modelo, al cual se recurre ampliamente en los SDM para mapas realizar mapas binarios (Escalante *et al.*, 2015; Liu, White y Newell, 2013). Determinamos mediante mapas de consenso (áreas de coincidencia de los diez GCM) el área de distribución potencial para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México en los tres escenarios de cambio climático RCP.

Resultados

El modelo de distribución potencial actual para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México sirvió de base para proyectar la distribución potencial para los 10 GCMs en cada uno de los tres escenarios de cambio climático; RCP 2.6, 4.5 y 8.5 mostraron un buen desempeño con un área bajo la curva (AUC) de 0,98 y una ROC-Parcial de 1,98 $p < 0,001$. Ocho variables climáticas contribuyeron con el 90 % para la generación del modelo, siendo la temperatura media del trimestre más caliente, la precipitación total anual y la precipitación del trimestre más húmedo las tres variables más importantes en la contribución al modelo con 26,3 %, 14,4 % y 14,4 %, respectivamente.

Con base en las ecorregiones propuestas por Olson *et al.* (2001), el modelo de la distribución potencial para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México se encuentra asociado principalmente a los bosques de pino-encino del Eje Volcánico Transversal Mexicano (Michoacán, Jalisco, Estado de México, Morelos, Puebla, Tlaxcala y norte de Guerrero) y Sierra Madre del Sur (Michoacán, Guerrero y Oaxaca), en el centro y occidente del país, respectivamente (figura 1). Sin embargo, el modelo

también muestra alto potencial para el establecimiento de cultivos de aguacate en los bosques de pino-encino de la Sierra Madre Occidental del estado de Nayarit y en los bosques de pino-encino de América Central del estado de Chiapas (figura 1).

Tomando como base el valor de probabilidad de 0,279, para generar los mapas binarios (presencia/ausencia) y cuantificar la superficie de la distribución potencial actual y futura para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México, estimamos una superficie potencial actual de 44,593 km² (figura 2A). Con base en los modelos de distribución potencial para el establecimiento de aguacate en México de los diez GCM y los tres escenarios de cambio climático RCP 2.6, 4.5 y 8.5, la superficie estimada para México fue diferente (figura 3).

El porcentaje de pérdida de superficie potencial para el establecimiento de cultivos de aguacate en México para el escenario RCP 2.6 y 4.5 varió de 0,7 % y 7,8 %

(HadGEM2-ES) hasta 45,9 % y 60,6 % (GFDL-CM3), respectivamente (GFDL-CM3). En el escenario RCP 8.5 varió de 2,6 % (MPI-ESM-LR) hasta 70,1 % (IPSL-CM5A-LR) (figura 3). En promedio de los diez GCM para el año 2050 en el escenario RCP 2.6 se perdería el 20,9 % de la superficie con potencial actual para el cultivo de aguacate en México, 31,2 % en el escenario RCP 4.5 y 34,8 % para el escenario RCP 8.5. Si consideramos la superficie de los mapas de consenso (áreas donde coinciden los modelos de los diez GCM) la pérdida de superficie para el establecimiento de cultivos de aguacate en México para el escenario más optimista, el RCP 2.6 es de 79,4 %. Mientras que para el escenario más pesimista RCP 8.5 sería de 87,6 % (figuras 2B, 2D).

Con base en los diferentes escenarios de cambio climático para el año 2050, grandes áreas potenciales para el establecimiento de cultivos de aguacate desaparecerían de los estados de Nayarit, Guanajuato, Guerrero, Morelos y Puebla (figura 2).

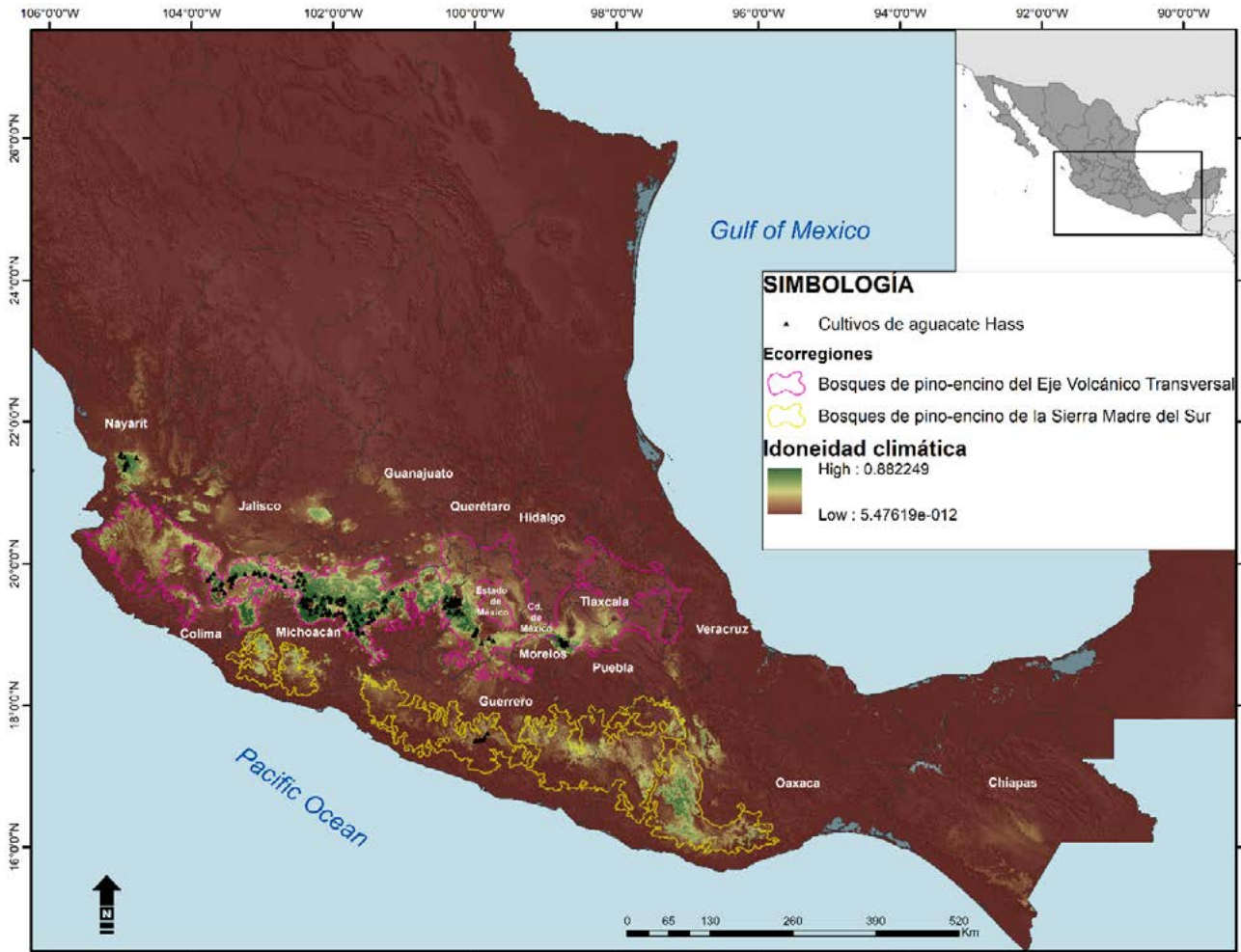


Figura 1. Distribución potencial actual para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México. Ecorregiones

Fuente: Olson *et al.* (2001).

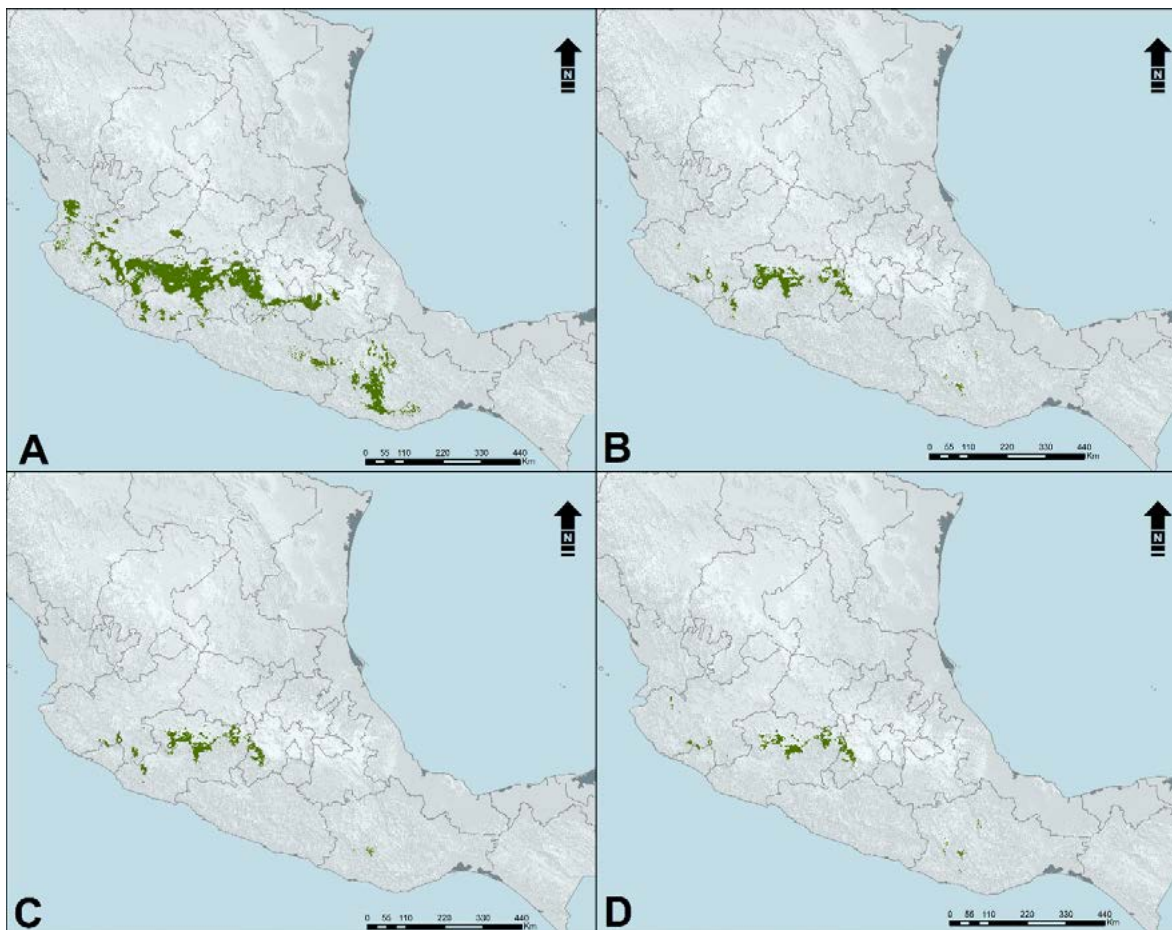


Figura 2. Áreas potenciales actualmente (A) y mapas de consenso para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México ante escenarios de cambios climático para el año 2050. B) RCP 2.6, C) RCP 4.5 y D) RCP 8.5.

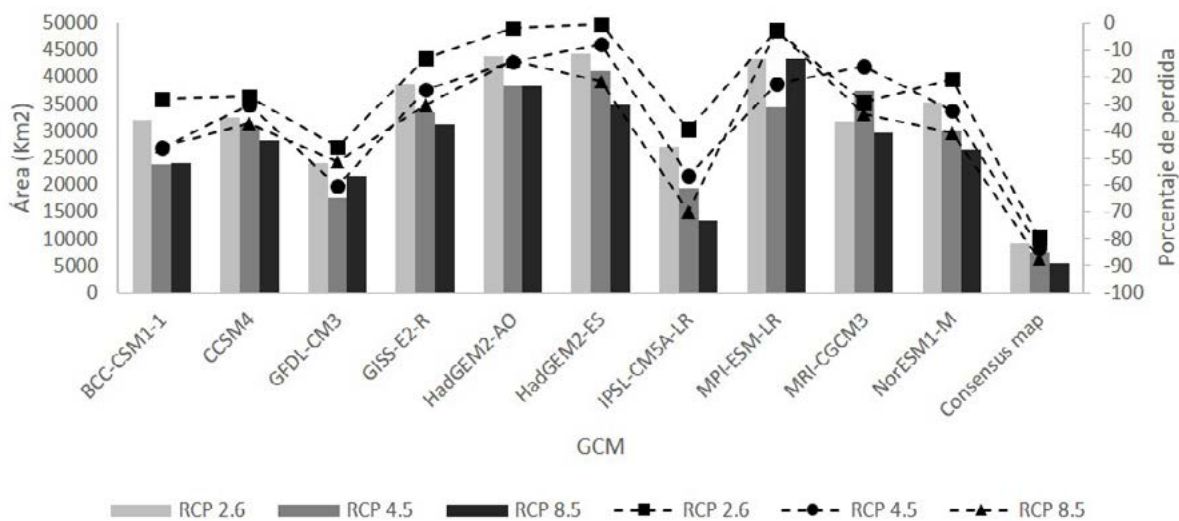


Figura 3. Superficie potencial para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass para el año 2050 en México

El gradiente altitudinal donde actualmente existen áreas potenciales para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass, con base en nuestros resultados, está entre los 531 y 3372 m. Sin embargo, el gradiente altitudinal varía con respecto a las áreas potenciales para cada uno de los escenarios de cambio climático para el año 2050. Las áreas potenciales en el escenario optimista (RCP 2.6) se encontrarían entre los 1152 y 3296 m y para el escenario pesimista (RCP 8.5) se encontrarían entre los 1459 y 3391 m.

Discusión

A pesar de que México es el principal productor y exportador de aguacate cv. Hass a nivel mundial, representando más del 4,3 % del PIB del país, con más de USD 3200 millones en exportaciones y que para el año 2030 se proyecta un aumento en su producción del 67 % (Sagarpa, 2017), no existía una estimación de las áreas potenciales para el establecimiento de estos cultivos a nivel nacional y los impactos que el cambio climático tendrá en las áreas de cultivo potenciales.

Los sistemas ecológicos, incluidos los cultivos de aguacate, son extremadamente dinámicos y constantemente influenciados por la variabilidad del clima, por lo cual, el cambio climático tendría un impacto negativo sobre los cultivos de aguacate en México, en función de la rapidez y la magnitud con la que los valores medios y extremos de la temperatura y precipitación se presenten en los próximos años y considerando que el cambio climático será más rápido que los procesos de adaptación y resiliencia de los cultivos (Sánchez-Pérez 2012). Se estima que en México, el sector agrícola será uno de los más afectados por el cambio climático, al provocar cambios en la temperatura y precipitación que aumentarían la ocurrencia de sequías e inundaciones (Sosa-Rodríguez, 2015). En este sentido, nuestros resultados sugieren que independientemente del modelo de circulación global o el escenario de las trayectorias de concentración representativas utilizados para estimar el impacto del cambio climático para el año 2050 en las áreas potenciales para el establecimiento de cultivos de aguacate cv. Hass en México, se espera una importante pérdida en las superficies climáticamente aptas para que se pueda desarrollar este cultivo (figuras 2, 3).

Actualmente, existe una gran cantidad de trabajos en los que se emplean los modelos de distribución de especies para determinar el potencial que tienen los cultivos de establecerse en determinadas regiones del mundo (Elias *et al.*, 2017; Ramírez-Gil, Morales y Peterson, 2018; Vallejo-Pérez *et al.*, 2017; Wei *et al.*, 2018). Sin embargo, en aquellos donde se proyectan las distribuciones potenciales bajo escenarios de cambio climático, los modelos de circulación global utilizados podrían no mostrar una tendencia de los impactos ocasionados por el cambio climático y llevar a

conclusiones y medidas de manejo erróneas. Nuestros resultados muestran que, si bien la tendencia para el año 2050 es la disminución de las superficies potenciales para el establecimiento de cultivos de aguacate en México en los diferentes escenarios RCP, la variación entre las estimaciones proporcionadas por los diez modelos de circulación global utilizados puede ser desde pérdidas de superficie de 0,75 % (HadGEM2-ES) hasta 45 % (GFDL-CM3) en el escenario más optimista (RCP 2.6), y de 2,6 % (MPI-ESM-LR) a 70 % (IPSL-CM5A-LR) en el escenario pesimista (RCP 8.5). En este sentido, sugerimos utilizar la mayor cantidad de modelos de circulación global para realizar las proyecciones de la distribución potencial ante escenarios de cambio climático para el establecimiento de cultivos y generar mapas de consenso, donde se observen las áreas de coincidencia en las superficies con condiciones óptimas para este propósito.

Conclusiones

Este estudio representa la primera estimación a nivel nacional de las áreas potenciales para el establecimiento del cultivo de aguacate cv. Hass y el impacto que el cambio climático tendría para este cultivo. Ante los escenarios económicos proyectados para el 2030, donde se estima un incremento del 67 % en la producción del cultivo con el valor comercial más importante del país, es importante tomar medidas en la planeación del territorio que permitan priorizar acciones de conservación y vigilancia en los bosques templados para evitar el cambio de uso de suelo y la reconversión de los bosques hacia cultivos de aguacate. Los modelos de distribución potencial de especies son una buena herramienta que permite predecir las áreas actuales y futuras con potencial para el establecimiento de cultivos; sin embargo, es importante utilizar un conjunto de modelos de circulación global que faciliten la observación de tendencias en los impactos del cambio climático sobre las áreas potenciales.

Referencias bibliográficas

- Álvarez-Bravo, A., Salazar-García, S., Ruiz-Corral, J. y Medina-García, G. (2017). Escenarios de cómo el cambio climático modificará las zonas productoras de aguacate 'Hass' en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 19, 4035-4048.
- Barrientos-Priego, A. (2010). El Aguacate. *Biodiversitas*, 88, 1-7.
- Choudhury, M.R., Deb, P., Singha, H., Chakdar, B. y Medhi, M. (2016). Predicting the probable distribution and threat of invasive *Mimosa diplotricha* Suavalle and *Mikania micrantha* Kunth in a protected tropical

- grassland. *Ecological Engineering*, 97, 23-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.018>
- Cobos, M.E., Peterson, T., Osorio-Olvera, L. y Barve, N. (2019). kuenm: An R package for detailed development of Maxent Ecological Niche Models. *PeerJ*, 7:e6281. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Elias, M.A.S., Borges, F.J.A., Bergamini, L.L., Franceschinelli, E.V. y Sujii, E.R. (2017). Climate change threatens pollination services in tomato crops in Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239, 257-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.026>
- Elith, J., Graham, C., Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Escalante, T., Rodríguez-Tapia, G., Linaje, M., Illoldi-Rangel, P. y González-López, R. (2015). Identification of areas of endemism from species distribution models: threshold selection and Nearctic mammals. *Tip*, 16(1), 5-17. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1405-888x\(13\)72073-4](https://doi.org/10.1016/s1405-888x(13)72073-4)
- Hernández-Aguilar, E. (2018). *Variación altitudinal de variables meteorológicas en el municipio de Zitácuaro, Michoacán: implicaciones para los usos de suelo agrícolas*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P. y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Londres: Cambridge University Press.
- Jodar-Abellan, A., Ruiz, M. y Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240-253.
- Liu, C., White, M. y Newell, G. (2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 40(4), 778-789. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.12058>
- Molinos, J., Poloczanska, E., Olden, J., Lawler, J. y Burrows, M. (2017). Biogeographical Shifts and Climate Change. En D. DellaSala y M. Goldstein (eds.), *Encyclopedia of the Anthropocene* (pp. 217-228). Ámsterdam, Países Bajos: Elsevier.
- Moratelli, R., De Andreazzi, C.S., De Oliveira, J.A. y Cordeiro, J.L.P. (2011). Current and potential distribution of *Myotis simus* (Chiroptera, Vespertilionidae). *Mammalia*, 75(3), 227-234. DOI: <https://doi.org/10.1515/MAMM.2011.028>
- Narouei-Khandan, H., Halbert, S., Worner, S. y Van Bruggen, A. (2016). Global climate suitability of citrus huanglongbing and its vector, the Asian citrus psyllid, using two correlative species distribution modeling approaches, with emphasis on the USA. *European Journal of Plant Pathology*, 144(3), 655-670. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0804-7>
- Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E., Burgess, N., Powell, G., Underwood, F., ... Kassem, K. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*, 51, 933-938.
- Osorio-Olvera, L. (2016). *NicheToolbox: a web tool for exploratory data analysis and niche modeling*. Recuperado de <http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/>
- Peterson, A. T., Papeş, M. y Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Phillips, S., Anderson, R. y Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distribution. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Dudík, M., Schapire, R.E. y Blair, M.E. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887-893. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Qiao, H.; Soberón, J. y Peterson, A.T. (2015). No silver bullets in correlative ecological niche modeling: Insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(10), 1126-1136. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12397>
- Ramírez-Gil, J.G., Morales, J.G. y Peterson, A.T. (2018). Potential geography and productivity of "Hass" avocado crops in Colombia estimated by ecological niche modeling. *Scientia Horticulturae*, 237(abril), 287-295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.021>
- Sánchez-Pérez, J. (2012). Adaptación al cambio climático. En G. Chávez León, L. Tapia-Vargas, M. Bravo-Espinoza, J. Sáenz-Reyes, H. Muñoz-Flores, I. Vidales-Fernández, ... J. Alcántar-Rocillo (eds.), *Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate* (pp. 57-63). Uruapan, Michoacán, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030 "Aguacate Mexicano"*. Ciudad de México, México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2017). *Estadística de producción agrícola*. Recuperado de <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L. y Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y

- modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437-441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Sosa-Rodríguez, F. (2015). Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 6(2), 4-23.
- Vallejo Pérez, M.R., Téliz Ortiz, D., De La Torre Almaraz, R., López Martínez, J.O. y Nieto Ángel, D. (2017). Avocado sunblotch viroid: Pest risk and potential impact in México. *Crop Protection*, 99, 118-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.05.015>
- Villanueva-Tomas, T. y Zepeda-Anaya, J. (2016). La producción de aguacate en el estado de Michoacán y sus efectos en los índices de pobreza, el cambio del uso de suelo y la migración. *Revista Mexicana sobre Desarrollo Local*, 2(1), 1-12.
- Wei, B., Wang, R., Hou, K., Wang, X. y Wu, W. (2018). Predicting the current and future cultivation regions of *Carthamus tinctorius* L. using MaxEnt model under climate change in China. *Global Ecology and Conservation*, 16, e00477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00477>

